

Schlussbericht

Entwicklung des Wasserdargebots im Kanton Zürich

Zukünftige Abflussszenarien für den Kanton Zürich

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee, und Landschaft WSL



Autoren

Florian Lustenberger, Massimiliano Zappa, Tobias Wechsler

28.05.2021

Auftraggeber: **Kanton Zürich**
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Abteilung Wasserbau

Marco Walser
(Sektionsleiter, Gewässernutzung, Sektion Geoinformation und Hydro-
metrie)

Dr. Stephan Suter
(Sektionsleiter Stv. AL, Sektion Planung)

Christoph Noll
(Sektionsleiter, Sektion Gewässernutzung)

Kontakt AWEL: Marco Walser
marco.walser@bd.zh.ch

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

Dr. Massimiliano Zappa
(Gruppenleiter, Hydrologische Vorhersagen)

Florian Lustenberger
(Wissenschaftlicher Assistent, Hydrologische Vorhersagen)

Tobias Wechsler
(Doktorand, Hydrologische Vorhersagen)

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



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

Zusammenfassung

Das globale Klima verändert sich und damit einhergehend auch das Wasserdargebot der Schweizer Gewässer. In dieser Studie wurden anhand der CH2018 Klimaszenarien und den hydrologischen Projektionen Hydro-CH2018, Abflusszenarien für den Kanton Zürich erstellt. Dafür wurden für kantonale Einzugsgebiete neue Routing Modelle erstellt, die zusammen mit dem hydrologischen Modell genauere Abflusssimulationen lieferten.

Die Abflusszenarien haben gezeigt, dass sich die mittleren Abflüsse im Kanton Zürich bis Ende des Jahrhunderts saisonal verändern werden. Im Winter ist wegen der Niederschlagszunahme mit einer Abflusszunahme zu rechnen. Diese variiert je nach Einzugsgebiet, betrachteter Zeitperiode und Emissionsszenario. Die grösste Veränderung ist bei der Reuss in Mellingen im Januar Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 mit +55 % Abfluss (im Vergleich zur Referenzperiode 1981 – 2010) zu erwarten. Im Sommer ist, verursacht durch ein Niederschlagsdefizit, mit einer deutlichen Abflussabnahme zu rechnen. Die grösste Veränderung ist bei der Reuss in Mellingen im August Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 mit -51 % zu erwarten. Die mittleren jährlichen Abflüsse verändern sich in den meisten Einzugsgebieten nicht eindeutig (kein ausgeprägter Trend zur Zu- oder Abnahme). Bei der Sihl, der Limmat und der Reuss könnten die Jahresmittelwerte jedoch in Zukunft tiefer liegen. Bis Ende Jahrhundert und unter RCP 8.5 sind dies -8 % bis -9 %.

Bei der Limmat, dem Rhein und der Reuss ist damit zu rechnen, dass sich das Abflussminimum der Medianabflüsse innerhalb des Jahres vom Winter in den Sommer verschiebt. Beim Niedrigwasser, Q_{347} , ist in allen Einzugsgebieten bis Ende Jahrhundert eher mit einer Abnahme zu rechnen. Die grösste Abnahme ist bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 bei der Thur mit -41 % zu erwarten.

Handlungsbedarf für den Kanton Zürich besteht aus Sicht der WSL vor allem für das künftige Abflussdefizit im Sommer/Herbst.

Info zum Beilagematerial

Im Bericht werden für eine bessere Übersicht meist nur die Flusseinzugsgebiete als Ganzes diskutiert. Zu diesem Bericht wurde dem AWEL deshalb eine Ordnerstruktur mit den Daten, Tabellen und Grafiken für alle Teileinzugsgebiete übergeben. Dieses Beilagematerial ist als Anhang zum vorliegenden Bericht anzusehen.

Schlüsselbegriffe

Im Folgenden werden für diesen Bericht wichtige Begriffe aufgeführt und grob erklärt. Alle Begriffe werden im Fliesstext später 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 (PREVAH in Kombination mit Routing Modellen) 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 im Zeitraum von 1981 bis 2099. Diese Daten können in PREVAH für die Erstellung von Abflussszenarien verwendet werden.
Flusseinzugsgebiet	Die in dieser Studie betrachteten Einzugsgebiete: Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat, Sihl, Thur, Rhein, Reuss. Gebiete, in denen neue Routing Modelle erstellt wurden (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Sihl), wurden weiter in Teileinzugsgebiete unterteilt.
Kontrollsimulation (CTRL)	Simulierter Abfluss (PREVAH in Kombination mit Routing Modellen) der Referenzperiode, erstellt mit gemessenen Meteorodaten als Input für PREVAH.
Hydrologisches Modell	In diesem Bericht wird der Begriff für das Modell PREVAH verwendet. Hydrologisches Routing wird separat betrachtet, braucht den von PREVAH simulierten Abfluss als Input und wird unter dem Begriff «Routing Modell» verwendet.
Modellketten	Die CH2018 Klimaszenarien bestehen aus diversen Modellkombinationen (=Modellketten) und decken die Unsicherheit innerhalb eines RCPs ab.
PREVAH	Das verwendete hydrologische Modell zur Abflusssimulation in den Teileinzugsgebieten. Zusätzlich wurden aber noch Routing Modelle verwendet.
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenario = künftige Entwicklung der Treibhausgase in der Atmosphäre): RCP 2.6 = starke Emissionsminderung / RCP 4.5 = schwache Emissionsminderung / RCP 8.5 = keine Emissionsminderung.
Referenzperiode	Zeitperiode von 1981 bis 2010. Sie wird für die Kalibration und Validation der Modelle (PREVAH und Routing Modelle verwendet) und zur Überprüfung der Abflussszenarien mit der Kontrollsimulation.
Routing Modell	Umverteilung und oder gedämpfte Abgabe des Abflusses von A nach B. Der von PREVAH simulierte Abfluss der Teileinzugsgebiete dient als Input für die Routing Modelle.
Teileinzugsgebiet	Unterteilung der kantonalen Flusseinzugsgebiete in kleinere Einzugsgebiete für die Abflusssimulation (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Sihl).
VZ ₇₅ , VZ ₁₀₀	Vorzeichenübereinstimmung der Abflussszenarien/Modellketten von 75 % oder mehr (respektive 100 %), innerhalb eines RCPs.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	II
SCHLÜSSELBEGRIFFE	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
1 EINLEITUNG UND PROJEKTDESCHEIBUNG	1
2 UNTERSUCHUNGSGBIET	2
3 METHODEN	3
3.1 ZUSAMMENFASSUNG	3
3.2 DATEN	3
3.3 KLIMASZENARIEN	4
3.4 MODELLIERUNGSPROZESS	6
3.5 MODELLVERIFIKATION	6
3.5.1 Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE)	6
3.5.2 Volumenfehler (DV)	7
3.5.3 Root Mean Squared Error (RMSE)	7
3.6 HYDROLOGISCHES MODELL: PREVAH	7
3.7 ROUTING MODELLE	9
3.7.1 Reppisch	11
3.7.2 Glatt	11
3.7.3 Töss	13
3.7.4 Furtbach	14
3.7.5 Zürichsee und Limmat	14
4 AUSWERTUNGEN	16
4.1 KONTROLLE DER ABFLUSSSZENARIEN	16
4.2 ZUKÜNFTIGES WASSERDARGEBOT	16
4.3 VERÄNDERUNG DES NIEDRIGWASSERS	17
5 RESULTATE	19
5.1 ZUSAMMENFASSUNG	19
5.2 MODELLPERFORMANCE KONTROLLSIMULATION	19
5.2.1 Reppisch	19
5.2.2 Glatt	19
5.2.3 Töss	20
5.2.4 Furtbach	20
5.2.5 Limmat	20
5.3 KONTROLLE DER ABFLUSSSZENARIEN (REFERENZPERIODE)	22
5.4 ZUKÜNFTIGES WASSERDARGEBOT	25
5.4.1 Reppisch	25
5.4.2 Greifensee	26
5.4.3 Glatt	26
5.4.4 Töss	27
5.4.5 Furtbach	27
5.4.6 Zürichsee	27
5.4.7 Limmat	28
5.4.8 Sihl	29
5.4.9 Thur	29
5.4.10 Rhein	30
5.4.11 Reuss	31
5.5 VERÄNDERUNG DES NIEDRIGWASSERS	55
5.5.1 Reppisch	55
5.5.2 Glatt	55
5.5.3 Töss	55

5.5.4	<i>Furtbach</i>	55
5.5.5	<i>Limmat</i>	56
5.5.6	<i>Sihl</i>	56
5.5.7	<i>Thur</i>	56
5.5.8	<i>Rhein</i>	56
5.5.9	<i>Reuss</i>	57
6	DISKUSSION VERÄNDERUNGEN WASSERDARGEBOT	68
6.1	MITTLERE MONATS- UND JAHRESABFLÜSSE	68
6.2	MEDIAN DER 50 % PERZENTIL-ABFLÜSSE (MEDIANABFLÜSSE)	69
6.3	MEDIAN DER 10 % PERZENTIL-ABFLÜSSE & Q ₃₄₇	69
6.4	MEDIAN DER 90 % PERZENTIL-ABFLÜSSE.....	70
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	71
	LITERATUR	72

1 Einleitung und Projektbeschreibung

Das globale Klima verändert sich kontinuierlich. Menschgemachte Treibhausgasemissionen führen zu global erhöhten Temperaturen in der Atmosphäre (IPCC, 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 geringer und früher im Jahr aus und die Gletscher ziehen sich zurück (Bernhard and Zappa, 2012; Bernhard *et al.*, 2013; Huss and Hock, 2015; CH2018, 2018; Zekollari *et al.*, 2019). Dies hat negative Folgen für das Wasserdargebot. Der Abfluss in diversen Gewässern der Schweiz hat in den letzten Jahrzehnten bereits markant abgenommen (Michel *et al.*, 2020). Basierend auf den CC2011 Daten, könnte die Nordschweiz zukünftig aber über mehr Wasserressourcen verfügen, verursacht durch eine Niederschlagszunahme im Herbst, Winter und Frühling (Bosshard *et al.*, 2011; Bernhard and Zappa, 2012). Neuere Forschungsergebnisse zeigen aber keine grossen Veränderungen im mittleren Jahresniederschlag, jedoch eine Niederschlagsabnahme im Sommer und eine Niederschlagszunahme im Winter (CH2018, 2018; BAFU, 2021). Bosshard *et al.* (2011) und Brunner *et al.* (2019) prognostizierten, dass ein Wasserdefizit in der Nordschweiz, verursacht durch ein Niederschlagsdefizit, vor allem in den Sommermonaten auftreten könnte. Es ist deshalb von zentraler Bedeutung das zukünftige Wasserdargebot in Teilen Nordschweiz mehr im Detail anzuschauen.

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, Prognosen für das zukünftige Wasserdargebot (sogenannte Abflussszenarien) 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 Atlases der Schweiz (HADES) öffentlich und interaktiv zur Verfügung.

In dieser Studie wurden die CH2018 Klimaszenarien für die relevanten Einzugsgebiete im Kanton Zürich verwendet, um die entsprechenden Abflussszenarien zu berechnen. Ziel dieser Studie war es, die Veränderungen des Wasserdargebots des Kantons Zürich der Fliessgewässer (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat, Sihl, Thur, Rhein, Reuss) und der zwei Seen (Zürichsee, Greifensee) für die Zukunft (2035, 2060, 2085) zu bestimmen. Damit soll, im Hinblick auf künftige Konzessionserteilungen für die Wassernutzung aus den genannten Oberflächengewässern, eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden. Die Studie richtet sich an sämtliche Akteure der Wasserwirtschaft im Kanton Zürich. Die Ergebnisse sollen den gegenwärtigen und künftigen Nutzern (bspw. Wasserkraftwerke, Wasserversorgung, Landwirtschaft, Industrie, etc.) eine Grundlage zur Entwicklung der Wasserverfügbarkeit bereitstellen, die für die langfristige Betriebsplanungen unterstützend sein soll (bspw. Bau von Bewässerungsanlagen, Investitionen in wasserintensive industrielle Prozesse, etc.).

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie war der Kanton Zürich. Er umfasst eine Fläche von rund 1730 km². Seine höchste Erhebung ist das Schnebelhorn mit 1291 m ü. M (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2020). Eine Vergletscherung auf Kantonsgebiet ist nicht vorhanden. Allerdings führen diverse Zuflüsse (z.B. Rhein, Linthkanal, Reuss) Gletscherschmelzwasser aus den Alpen mit sich, weshalb die zukünftige Entwicklung der alpinen Gletscher in dieser Studie ebenfalls betrachtet wurde.

Gemäss Auftrag wurde das Kantonsgebiet in relevante Flusseinzugsgebiete aufgeteilt (Abbildung 2.1), die bei der Modellierung separat kalibriert und validiert wurden. Dafür wurden folgende Flusseinzugsgebiete definiert: Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat, Sihl, Thur, Rhein, Reuss. Für eine detailliertere Betrachtung des Wasserdargebots wurden die Flusseinzugsgebiete der kantonalen Gewässer (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Sihl) weiter in kleinere Teileinzugsgebiete aufgeteilt. Diese Teileinzugsgebiete wurden basierend auf den Abflussmessstationen von Kanton Zürich und Bundesamt für Umwelt (BAFU) mit Messdaten, wo verfügbar seit 1981 (spätestens aber seit 1986), festgelegt oder, insofern keine Stationen verfügbar waren, subjektiv bestimmt. Der Abfluss der Limmat wurde nur beim Zürichsee betrachtet. Bei den Flüssen, die grösstenteils ausserhalb des Kanton Zürichs liegen (Grosseinzugsgebiete/Gross-EZGs), wurde der Abfluss nur an den relevanten BAFU Station angeschaut (Thur, Andelfingen / Rhein, Neuhausen und Rekingen / Reuss, Mellingen).

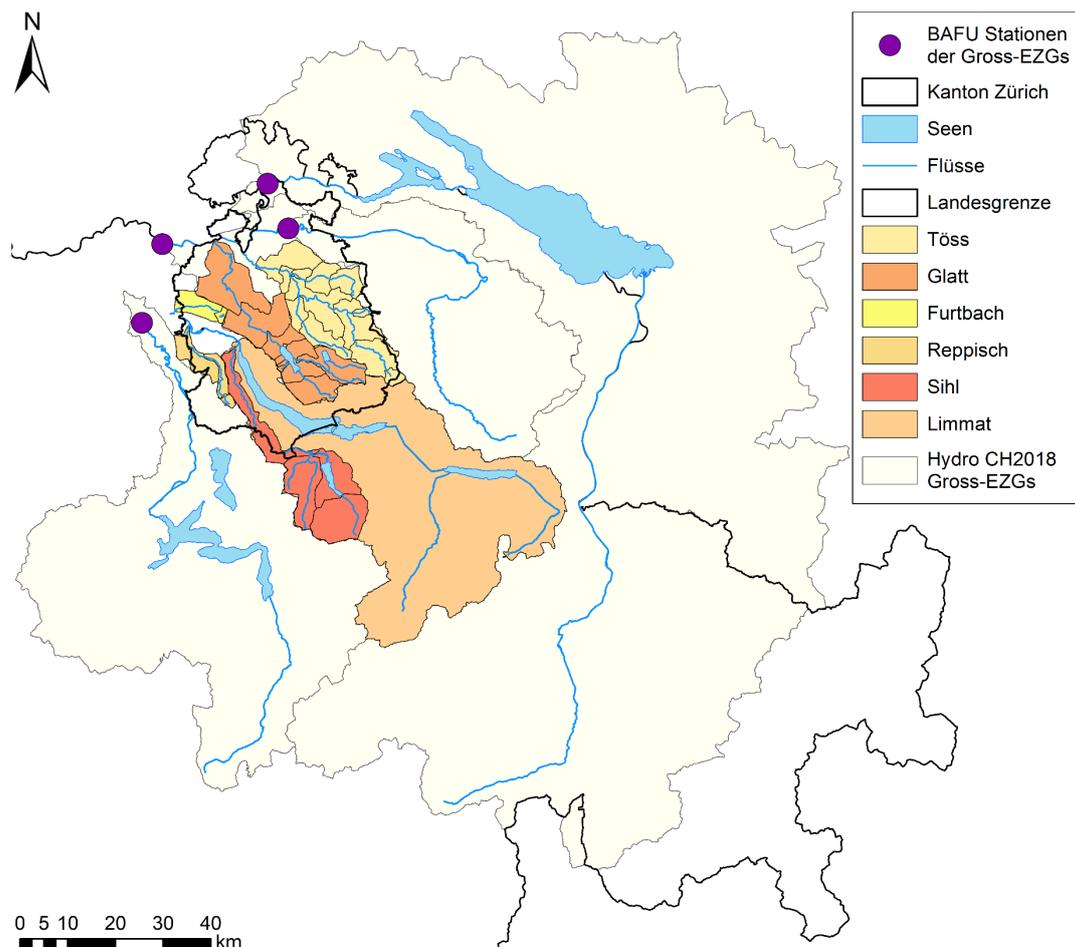


Abbildung 2.1 Karte mit den Flusseinzugsgebieten (inkl. den Teileinzugsgebieten, insofern diese betrachtet wurden) Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat und Sihl. Für die Flüsse, die grösstenteils ausserhalb des Kantons liegen (Gross-EZGs: Thur, Rhein, Reuss), wurden nur die relevanten BAFU Stationen (Abfluss an den violetten Punkten) betrachtet.

3 Methoden

3.1 Zusammenfassung

Um mögliche zukünftige Abflüsse (Abflussszenarien) zu berechnen, wurden die CH2018 Klimaszenarien als Input in das hydrologische Modell verwendet. In dieser Studie wurde das hydrologische Modell PREVAH (PREcipitation Runoff EVApotranspiration HRU related Model; HRU = Hydrological Response Units) in der gegitterten Version für die Simulation der Abflüsse in den Teileinzugsgebieten verwendet. Um den Abfluss der Teileinzugsgebiete innerhalb der Flusseinzugsgebiete zu verknüpfen und die Effekte der Seen (Greifensee, Pfäffikersee, Türlensee, Zürichsee) zu berücksichtigen, wurden sogenannte Routing Modelle verwendet. Für die Reppisch, die Glatt, die Töss, den Furtbach und die Limmat wurden neue Routing Modelle entwickelt. Für die Sihl, die Thur, den Rhein und die Reuss wurden bestehende Routing Modelle aus früheren Studien verwendet.

Die Abflussszenarien bestehen aus mehreren Modellketten, die den Unsicherheitsbereich darstellen. Pro Emissionsszenario (RCP 2.6 = starker Klimaschutz, RCP 4.5 = begrenzter Klimaschutz, RCP 8.5 = kein Klimaschutz) stehen 8 bis 18 Modellketten zur Verfügung. Die Abflussszenarien wurden für vier Zeitperioden berechnet: die Referenzperiode (1981 - 2010), eine nahe Zukunft (2020 - 2049), eine mittlere Zukunft (2045 - 2074) und eine ferne Zukunft (2070 - 2099). Die Referenzperiode dient der Kontrolle der Abflussszenarien und dem Vergleich mit den Zukunftsperioden, sodass Aussagen zur relativen Veränderung der zukünftigen Abflüsse gemacht werden konnten.

3.2 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:

- **Abflussmessungen** vom Kanton Zürich und dem BAFU wurden für alle Teileinzugsgebiete für die Kalibration und Validierung des hydrologischen Modells und der Routing Modelle (siehe Abschnitte 3.6 und 3.7) verwendet. Es wurde dabei mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag gearbeitet (1981 – 2019).
- **Meteorologische Messungen** der MeteoSchweiz Stationen, die für die Teileinzugsgebiete relevant sind, wurden als Input in das hydrologische Modell verwendet. Es wurden Stundenwerte von 1975 – 2016 von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relativer Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer verwendet.
- **Digitales 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 auf 12 hydrologische Klassen 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 3.6).

- Die **Parameter für das Hydrologische Modell** wurden aus dem CCHydro Projekt (Bernhard and Zappa, 2012) übernommen (siehe Abschnitt 3.6) und den lokalen Bedingungen in den Teileinzugsgebieten leicht angepasst.
- **Klimaszenarien** CH2018 des Nationalen Zentrums für Klimadienleistungen (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 3.4.

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, die von Moss *et al.* (2010) definiert wurden:

RCP 2.6 (Farbcode gelb)

- starke Emissionsminderung (starker Klimaschutz)
- Mit einer umgehenden Senkung der Treibhausgasemissionen durch CO₂-freie Energieerzeugung wird der Anstieg der Treibhausgasemissionen nach ca. 20 Jahren gestoppt. Das Klima erwärmt sich dabei bis Ende des 21. Jahrhunderts um ca. 1.5 °C gegenüber dem vorindustriellen Level (Akademien der Wissenschaft Schweiz, 2016; NCCS, 2019).

RCP 4.5 (Farbcode blau)

- schwache Emissionsminderung (begrenzter Klimaschutz)
- Die Treibhausgasemissionen werden eingedämmt, allerdings unzureichend. Die Konzentration in der Atmosphäre steigt noch weitere 50 Jahre an und dadurch wird die Temperatur nicht bis Ende des 21. Jahrhunderts stabilisiert. Das 2 °C Ziel des Pariser Klimaabkommens wird nicht erreicht (Akademien der Wissenschaft Schweiz, 2016; NCCS, 2019).

RCP 8.5 (Farbcode violett)

- keine Emissionsminderung (kein Klimaschutz)
- Die Treibhausgasemissionen nehmen weiter zu. Es werden keine expliziten Klimaschutzmassnahmen ergriffen. Das Klima erwärmt sich weiter (Akademien der Wissenschaft Schweiz, 2016; NCCS, 2019).

Als Datengrundlagen für hydrologische Modelle stehen zu allen drei RCPs diverse Modellketten zur Verfügung. 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. Insgesamt stehen 39 Modellketten (Tabelle 3.1) mit meteorologischen Variablen (Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, globale Strahlung, oberflächennaher Wind) für die Periode 1981-2099 zur Verfügung (die Modellketten beinhalten auch Werte für die Vergangenheit!). Allerdings haben nicht alle drei RCPs gleich viele Modellketten:

- RCP 2.6: 08 Modellketten
- RCP 4.5: 13 Modellketten
- RCP 8.5: 18 Modellketten

Als Referenzperiode wurde die Standardperiode für CH2018-Daten verwendet. Sie umfasst die Jahre 1981 – 2010 und wird als Referenzperiode oder Ref bezeichnet. Für die Zukunft wurden drei Perioden erstellt (nah, mittel und fern). Total wurden also mit den CH2018-Daten vier Zeitperioden betrachtet, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Referenzperiode (Ref): Sie umfasst die Jahre 1981 – 2010 (Farbcode grau).
- Nahe Zukunft (**2035**): Sie umfasst die Jahre 2020 – 2049 (Farbcode hellblau).
- Mittlere Zukunft (**2060**): Sie umfasst die Jahre 2045 – 2074 (Farbcode orange).
- Ferne Zukunft (**2085**): Sie umfasst die Jahre 2070 – 2099 (Farbcode grün).

Die ferne Zukunft wird oft auch als «Ende Jahrhundert» bezeichnet. Die Referenzperiode diente einerseits dem Vergleich mit den Kontrollsimulationen (siehe Abschnitt 5.3) und andererseits dem Vergleich mit den Werten der Zukunftsperioden, sodass relative zukünftige Abflussveränderungen definiert werden konnten (siehe Abschnitt 5.4).

Der Farbcode der drei RCPs und der vier Zeitperioden wird in allen Grafiken dieser, sowie oft auch in den Grafiken anderer, auf CH2018 Klimaszenarien basierenden Studien, gleich verwendet.

Tabelle 3.1 Die 39 verwendeten Modellketten basieren 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. Der Farbcode entspricht den Farben für die RCPs.

TEAM	RCM	GCM	RES	RCP	TEAM	RCM	GCM	RES	RCP
DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR11	RCP2.6	CLMCOM	CCLM4	HADGEM	EUR44	RCP8.5
KNMI	RACMO	HADGEM	EUR44	RCP2.6	CLMCOM	CCLM5	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	ECEARTH	EUR11	RCP2.6	CLMCOM	CCLM5	HADGEM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	ECEARTH	EUR44	RCP2.6	CLMCOM	CCLM5	MIROC	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	HADGEM	EUR44	RCP2.6	CLMCOM	CCLM5	MPIESM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	MIROC	EUR44	RCP2.6	DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR11	RCP8.5
SMHI	RCA	MPIESM	EUR44	RCP2.6	DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	NORESM	EUR44	RCP2.6	KNMI	RACMO	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR11	RCP4.5	KNMI	RACMO	HADGEM	EUR44	RCP8.5
DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	CCCMA	EUR44	RCP8.5
KNMI	RACMO	ECEARTH	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	ECEARTH	EUR11	RCP8.5
KNMI	RACMO	HADGEM	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	CCCMA	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	HADGEM	EUR11	RCP8.5
SMHI	RCA	ECEARTH	EUR11	RCP4.5	SMHI	RCA	HADGEM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	ECEARTH	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	MIROC	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	HADGEM	EUR11	RCP4.5	SMHI	RCA	MPIESM	EUR11	RCP8.5
SMHI	RCA	HADGEM	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	MPIESM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	MIROC	EUR44	RCP4.5	SMHI	RCA	NORESM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	MPIESM	EUR11	RCP4.5					
SMHI	RCA	MPIESM	EUR44	RCP4.5					
SMHI	RCA	NORESM	EUR44	RCP4.5					

3.4 Modellierungsprozess

Kontrollsimulation (CTRL)

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

Für alle Teileinzugsgebiete wurde das kalibrierte und validierte hydrologische Modell (siehe Abschnitt 3.6) mit den gemessenen Meteodaten für die Zeitperiode von 1975 – 2016 laufen gelassen. Die Zeit von 1975 bis 1981 diente als Vorlaufzeit. Die vom hydrologischen Modell simulierten Abflusswerte von 1981 – 2016 wurden dann durch Routing Modelle (Abschnitt 3.7) weiter prozessiert. Die Kontrollsimulation dient dem Vergleich mit den beobachteten Abflussdaten der gleichen Zeitperiode (als Indikator wie gut das hydrologische Modell und das Routing Modell zusammen den Abfluss simulieren konnten; siehe Abschnitt 5.2) und dem Vergleich mit den Abflusszenarien (als Indikator wie gut die Klimamodelle in Bezug auf den Abfluss sind; siehe Abschnitt 5.3).

Abflussszenarien

- Simulationen des Abflusses von 1981 – 2099 basierend auf den CH2018 Klimaszenarien-Meteodaten

Für die Berechnung des zukünftigen Wasserdargebots wurde dasselbe Schema (hydrologisches Modell in Kombination mit dem Routingmodell) verwendet wie bei der Kontrollsimulation, jedoch mit den Daten der Klimaszenarien von 1981 – 2099 (Abschnitt 3.3) als Input für das hydrologische Modell. Dabei ist zu bemerken, dass Abflussszenarien auch für die Referenzperiode (also in der Vergangenheit) erstellt wurden.

3.5 Modellverifikation

Vor der Modellkalibration wurden die verfügbaren Messdaten in zwei Teile aufgespalten. Ein Teil diente der Modellkalibration (1995 - 2005) und der andere der Modellverifikation oder Modellvalidation (1981 – 1994 und 2006 - 2019).

Um die Modellgüte zu bestimmen, wurden drei bekannte und in der Hydrologie oft verwendete Gütemasse verwendet.

3.5.1 Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE)

Die Nash-Sutcliffe Effizienz (*NSE*) ist das gängigste Gütemass und wurde von Nash & Sutcliffe (1970) wie folgt definiert:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Obs_i - Sim_i|^2}{\sum_{i=1}^n \left| Obs_i - \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n Obs_i \right] \right|^2} \quad (1)$$

Obs_i ist dabei der beobachtete (gemessene) Abfluss zum Zeitpunkt i , Sim_i der simulierte Abfluss zum Zeitpunkt i und n die Anzahl an Beobachtungen. Der Nenner entspricht der Varianz der Beobachtungen. Die *NSE* kann Werte von $-\infty$ bis 1 annehmen. Je höher der Wert, desto höher ist die Übereinstimmung der Simulation mit den Beobachtungen. Bei negativen Werten ist das Modell schlechter als eine Prognose mittels des Abflussmittelwertes der Beobachtungen. Ist die *NSE* = 0 performt das Modell gleich gut wie der Mittelwert. Bei einer *NSE* von 1 ist die Übereinstimmung von Beobachtung und Simulation perfekt.

3.5.2 Volumenfehler (DV)

Der Volumenfehler (*DV*, oft auch als PBIAS bezeichnet) gibt an um wie viele Prozent das Modell die Beobachtung unterschätzt (negative Werte) oder überschätzt (positive Werte). Er ist definiert als (Yapo *et al.*, 1996):

$$DV = \left| \sum_{i=1}^n \frac{Sim_i}{Obs_i} - 1 \right| * 100 \quad (2)$$

Bei einem Wert von 0 sind Simulation und Beobachtung bezüglich des Volumens identisch (es gibt keine Abweichung).

3.5.3 Root Mean Squared Error (RMSE)

Der Root Mean Squared Error (*RMSE*) ist die Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Differenz zwischen simulierten und beobachteten Werten. Da die Differenzen quadriert werden, werden grosse Abweichungen/Fehler stärker gewichtet. Der *RMSE* ist wie folgt definiert:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Sim_i - Obs_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Der *RMSE* hat dieselbe Einheit wie die Inputdaten, also z.B. m³/s oder mm/d. Je kleiner der *RMSE* ist, desto besser ist das Modell. Allerdings muss die Zahl immer im Verhältnis zum simulierten Wert betrachtet werden (bei einem kleinen Bach, wie dem Furtbach, ist ein *RMSE* von z.B. 1 m³/s gross, wohingegen ein *RMSE* von 1 m³/s bei einem grossen Fluss wie dem Rhein sehr klein ist).

3.6 Hydrologisches Modell: PREVAH

Für die Berechnung des Wasserdargebots im Kanton Zürich wurde das hydrologische Modell PREVAH (PREcipitation Runoff EVapotranspiration HRU related Model; HRU = Hydrological Response Units) verwendet. PREVAH ist ein konzeptionelles, prozessorientiertes Modell (Viviroli *et al.*, 2009b), 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 (Zappa *et al.*, 2012; Schattan *et al.*, 2013; Speich *et al.*, 2015). Um das Wasserdargebot im Kanton Zürich zu berechnen, wurde diese Gitterversion von PREVAH verwendet.

PREVAH besteht aus mehreren Modellkomponenten, die Teile des hydrologischen Kreislaufs abdecken (Viviroli *et al.*, 2009b): Interzeption von Niederschlag, Evapotranspiration, Schneedeckenentwicklung, Schmelze von Gletschern, Bodenwasserspeicherung, Grundwasser, Abflussbildung sowie Abflusskonzentration (siehe auch Abbildung 3.1). Bei der Kalibration des Modells müssen diverse Modellparameter (Abbildung 3.1) 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, 2009c) 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) und Speich *et al.* (2015) verwendet wurde. Die Parameter wurden aus diesem Parameterset entnommen. Nach der Verwendung der Routing Modelle (siehe Abschnitt 3.7) wurden für die, in dieser Studie neu aufgesetzten, Einzugsgebiete (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat) einige PREVAH-Parameter noch angepasst, um den lokalen Gegebenheiten besser zu entsprechen. Folgende PREVAH-Parameter wurden angepasst: PKOR (Niederschlagsanpassung für Regen), SNOKOR (Niederschlagsan-

passung für Schnee), K0H (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 (Viviroli *et al.*, 2009b). 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).

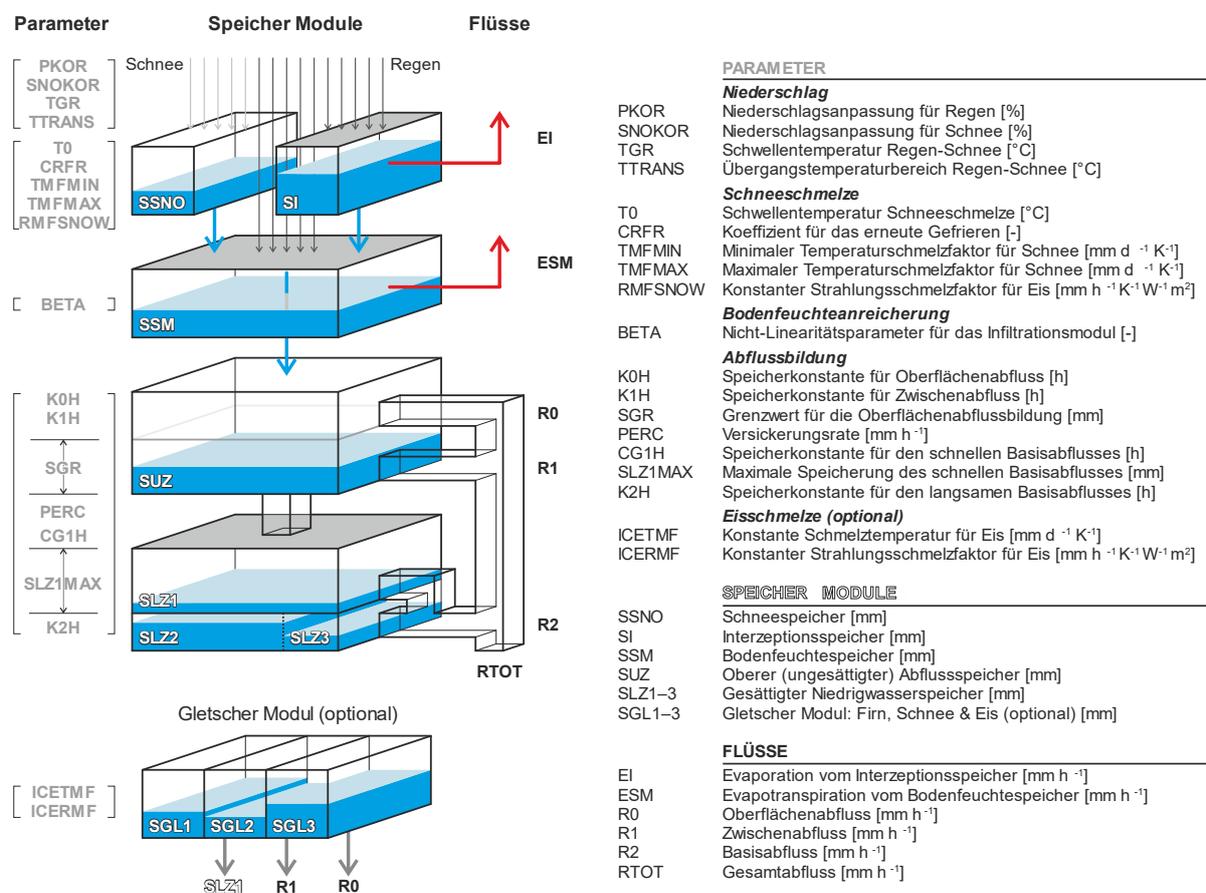


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung des PREVAH-Modells mit den Speichermodulen, den Flüssen und den zu bestimmenden Parametern. Die Grafik wurde in der eingefärbten Version von Viviroli (2007) übernommen und auf Deutsch übersetzt.

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).

3.7 Routing Modelle

PREVAH simuliert den Abfluss wie er natürlicherweise ohne grosse Vertiefungen im Gelände vorkommen würde. Seen werden also nicht korrekt berücksichtigt. Anthropogene Bauten wie Staudämme, Wehre und Überläufe oder Wasserkraftwerke, die Wasser verzögert abgeben, werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Um Abflussganglinien genauer erstellen zu können ist die Implementierung eines sogenannten Routing Modells (ein «Abflussübertragungsmodell», dass den Abfluss vom Kopfeinzugsgebiet zur Mündung bringt) notwendig (Bernhard and Zappa, 2012; Gutenson et al., 2020).

Mit PREVAH wurden die Abflüsse der Teileinzugsgebiete (q ; auch Gebietsabflüsse genannt) simuliert. Zuflüsse von flussaufwärtsliegenden Teileinzugsgebieten sind nicht eingerechnet. Für das Routing des Abflusses durch die Teileinzugsgebiete wurde deshalb ein simples Routing Modell erstellt. Im einfachsten Fall addiert dieses die von PREVAH generierten Abflüsse (m^3/s) der flussaufwärtsliegenden Teileinzugsgebiete ($a_1 - a_n$) zu dem des betrachteten Teileinzugsgebiets (b), um den Abfluss im Fließgewässer des betrachteten Teileinzugsgebiets (Q_b) zu erhalten.

$$Q_b = q_b + q_{a_1} + \dots + q_{a_n} \quad (4)$$

Über grössere Strecken kommt das Wasser aber oft verzögert an. Ist die Fließzeit grösser als die zeitliche Auflösung der Daten (hier ein Tag), muss dies berücksichtigt werden und der Abfluss über zwei Tage (t_1 und t_2) partitioniert werden. Dies wurde wie folgt umgesetzt:

$$Q_b(t_2) = Q_a(t_1) * p + Q_a(t_2) * (p - 1) + q_b(t_2), \quad (5)$$

wobei Q_b den Abfluss des betrachteten Fließgewässers beim Auslass des Teileinzugsgebietes darstellt, Q_a den Abfluss beim Teileinzugsgebiet flussaufwärts, t_1 und t_2 zwei aufeinanderfolgende Tage, p den Partitionierungsfaktor (zwischen 0 und 1) und q_b den im betrachteten Teileinzugsgebiet dazukommenden Gebietsabfluss. Der Partitionierungsfaktor wurde mit den gemessenen Daten so kalibriert, dass möglichst wenige Werte für q_b negativ (und somit wahrscheinlich nicht korrekt) waren. Ein negativer Gebietszufluss kann in der Natur nur bei hohen Versickerungsraten, Wasserentnahmen und/oder hoher Evapotranspiration entstehen.

Um das Wasser aus Seen gedämpft abzugeben, wurden für den Pfäffikersee, den Greifensee, den Türlensee und den Zürichsee zusätzliche Modelle verwendet. Für den Pfäffikersee und den Türlensee wurden einfache Linearspeicher definiert:

$$Q(t_2) = V(t_1)/k \quad (6)$$

Q steht dabei für den Seeabfluss, V für das aktive Wasservolumen im betrachteten See, t_1 und t_2 sind zwei aufeinanderfolgende Tage und k ist die zu kalibrierende Speicherkonstante. Das aktive Wasservolumen des Sees wurde mit der mittleren Seefläche, dem Wasserstand zum Zeitpunkt t und dem minimalen gemessenen Wasserstand berechnet. Für den Greifensee und den Zürichsee wurden andere Modelle verwendet (siehe Abschnitte 3.7.2 und 3.7.5)

Als Beispiel für den Effekt eines Routingmodells auf den Simulationsoutput ist hier die Glatt am Standort Wuhrbrücke (Messstation 531) aufgeführt. Diese Abflussmessstation befindet sich unterhalb des Greifensees und kann als Seeabfluss betrachtet werden. Bei der simplen Addition der von PREVAH simulierten Abflüsse nach Formel (4) entstehen generell eher zu hohe Abflüsse (Abbildung 3.2). Die beobachteten Daten für den Seeabfluss sind tiefer, da der See den Input dämpft. Durch die Verwendung eines geeigneten Routingmodells (für eine detailliertere Beschreibung für die Glatt siehe Abschnitt 3.7.2) verbesserte sich die visuelle Repräsentation der simulierten Abflussganglinie sowie auch die NSE (von -0.386 zu 0.847) und der $RMSE$ (von 3.041 zu 1.011). DV bleibt in der Größenordnung gleich, da das Routingmodell das Wasser zeitlich nur umverteilt und kein neues Wasser entsteht oder verloren geht (kleine Veränderungen bei DV können dadurch entstehen, dass Wasser an den Grenzen des betrachteten zeitlichen Bereichs dazukommt oder wegfällt).

Im Folgenden werden die genauen Routing Modelle der Flusseinzugsgebiete beschrieben, die für diese Studie neu aufgesetzt wurden (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat). Für die anderen Flusseinzugsgebiete (Reuss, Rhein, Thur, Sihl) wurden keine neuen Routing Modelle entwickelt. Für Reuss, Rhein und Thur wurden sie aus dem CCHydro Projekt (Bernhard and Zappa, 2012) übernommen, für die Sihl aus dem operationellen Hochwasservorhersagesystem IFKIS-Hydro Sihl, das von der WSL für die Stadt Zürich und das Sihltal betrieben wird (Zappa *et al.*, 2010). Das Einzugsgebiet der Sihl wurde für die Simulation in PREVAH in vier Teileinzugsgebiete aufgeteilt (Abbildung 2.1). Jedoch sind nur bei zwei Teileinzugsgebieten (Biberbrugg und Zürich) Abflussmessstationen zur Verifikation der simulierten Abflusswerte vorhanden. Teileinzugsgebiete, dessen simulierte Abflüsse nicht validiert werden konnten, könnten hohe Unsicherheiten enthalten und machen für die separate Betrachtung der Abflusszenarien keinen Sinn. Deshalb wurde bei den Auswertungen der Sihl mit nur zwei Teileinzugsgebieten (Biberbrugg und Zürich) gearbeitet. Bei der Glatt und der Reppisch wurden in den Routing Modellen im ersten Teil Seen (Türlersee, Pfäffikersee, Greifensee) mit einfachen Modellen berücksichtigt (siehe Abschnitte 3.7.1 und 3.7.2) weshalb in diesen Einzugsgebieten unterhalb der Seen die Performance der Routing Modelle angegeben wurde (nur die Performance der Routing Modelle, die bei der Kalibration gemessene

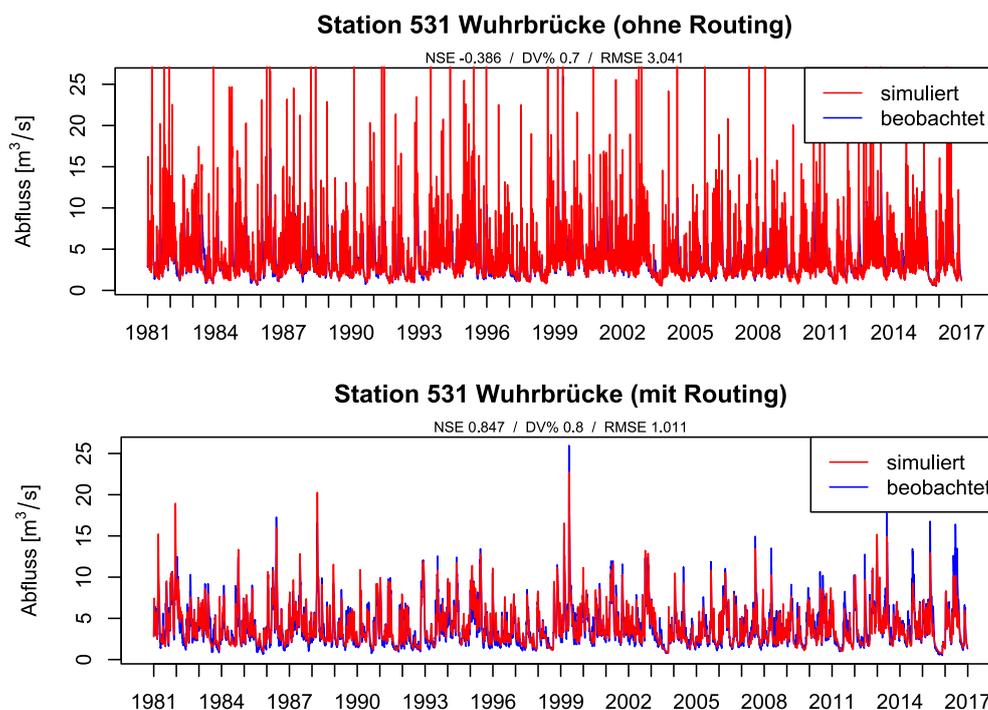


Abbildung 3.2 Simulierte (rot) und beobachtete (blau) Abflussganglinien bei der Glatt am Standort Wuhrbrücke (Station 531) ohne und mit der Verwendung eines geeigneten Routing Modells für den Greifensee.

Daten als Input hatten; für die Performance des hydrologischen Modells in Kombination mit den Routing Modellen für die ganzen Flusseinzugsgebiete siehe Abschnitt 5.2).

3.7.1 Reppisch

Das Routing Modell der Reppisch ist sehr simpel (Abbildung 3.3), da keine grossen Zuflüsse existieren und miteinbezogen werden mussten. Am Anfang steht der Türlensee, dessen Abfluss mithilfe eines Linearspeichers (siehe Formel (6)) simuliert wurde. Basierend auf den verfügbaren Messdaten (1986 – 2019) der Kantonalen Messstationen 552 (Wasserstand Türlensee) und 561 (Türlensee Abfluss) wurde ein k von 4.1 bestimmt. Der Wasserstand im Türlensee konnte nicht zufriedenstellend simuliert werden, da der See stark anthropogen beeinflusst (reguliert) wird. Zudem sind keine gemessenen Seezuflüsse vorhanden und diese mussten für die Kalibration des Modells abgeschätzt werden. Für die Simulation des Abflusses in der Reppisch ist dies aber kein Problem. Das Modell wurde mit den gemessenen Daten als Input für den Seeabfluss bei der Station 561 kalibriert und konnte diesen gut simulieren:

- Kalibration (1995 – 2005): NSE = 0.86, DV% = 0.9, RMSE = 0.04 m³/s
- Validation 1 (1986 – 1994): NSE = 0.89, DV% = 0.9, RMSE = 0.04 m³/s
- Validation 2 (2006 – 2019): NSE = 0.91, DV% = 1.1, RMSE = 0.03 m³/s

Um den Abfluss in der Reppisch bei den darauffolgenden Teileinzugsgebieten (Birmensdorf, Dietikon) zu berechnen, wurde die simple Addition (Formel (4)) verwendet. Die Abflusspartitionierung wurde bei der Reppisch nicht angewandt.

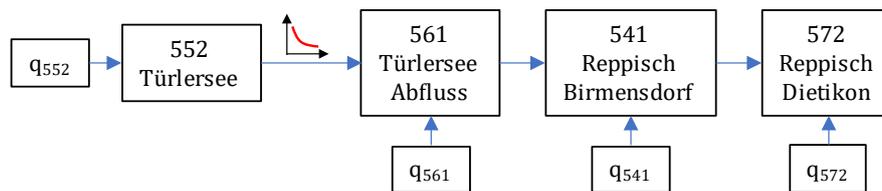


Abbildung 3.3 Routing Konzept verwendet für die Simulation des Abflusses der Reppisch. Die Nummern repräsentieren Messstationsnummern, q steht für den Abfluss, der innerhalb des Teileinzugsgebietes entsteht (Gebietsabfluss) und die rote Kurve symbolisiert die Verwendung eines Linearspeichers für den Abfluss aus dem Türlensee.

3.7.2 Glatt

Das Routing Modell der Glatt beginnt mit dem Zusammenfluss diverser Zuflüsse in den Greifensee (Abbildung 3.4). Der Abfluss des Greifensees wurde nicht mit einem Linearspeicher definiert, da in den gemessenen Daten eine klare Pegel-Abfluss (P-Q) Beziehung sichtbar ist (Abbildung 3.5). Um eine linienartige P-Q Beziehung zu erhalten, bei der jedem Wasserstand genau ein Abfluss zugeordnet werden konnte, wurde der gemessene Abfluss in 0.3 m³/s grosse Bereiche (Englisch «Bins») eingeteilt und der Median für die entsprechenden Wasserstände in diesen Bereichen berechnet. Diese Wasserstands-Mediane wurden bei den Mittelpunkten der Bereiche dem jeweiligen mittleren Abfluss des Bereichs (Mittelpunkt) zugeordnet. Zwischen den Mittelpunkten der Bereiche/Bins wurde dann linear interpoliert, um für jeden möglichen Abfluss einen Wasserstandwert (oder umgekehrt) zu erhalten. Für tiefe Abflüsse (< 1.2 m³/s) wurde vom entsprechenden Wasserstand eine lineare Abnahme bis 0 m³/s und dem tiefsten gemessenen Wasserstand (1981 - 2019) definiert. Für hohe Abflüsse (> 13.5 m³/s) wurde die lineare Regression verwendet. Es resultierte dabei eine kontinuierliche eindeutige P-Q Beziehung (schwarze Linie in Abbildung 3.5), die zur Berechnung des Greifenseeabflusses verwendet wurde.

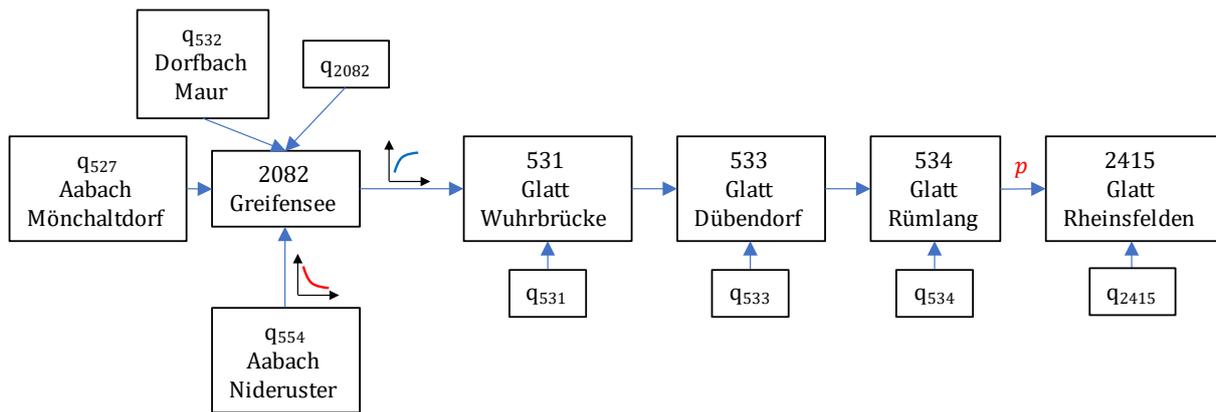


Abbildung 3.4 Routing Konzept verwendet für die Simulation des Abflusses der Glatt. Die Nummern repräsentieren Messstationsnummern, q steht für den Abfluss, der innerhalb des Teileinzugsgebietes entsteht (Gebietsabfluss), die rote Kurve symbolisiert die Verwendung eines Linearspeichers für den Zufluss q_{554} in den Greifensee (Abfluss aus dem Pfäffikersee), die blaue Kurve die Verwendung einer interpolierten Pegel-Abfluss Beziehung (basierend auf gemessenen Daten) für den Abfluss aus dem Greifensee und das rote p eine Abflusspartitionierung über zwei Tage.

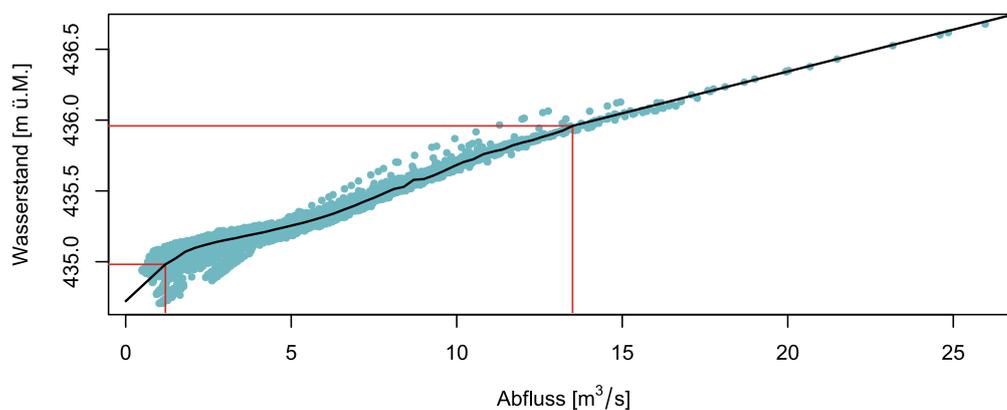


Abbildung 3.5 Pegel-Abfluss (P-Q) Beziehung des Greifensees basierend auf den gemessenen Daten von 1981 - 2019. Die schwarze Linie repräsentiert die im Routing Modell verwendete P-Q Beziehung. Die roten Linien markieren Bereiche, in denen eine andere Methode für die Erstellung des Modells (schwarze Linie) verwendet wurde (von links nach rechts): lineare Interpolation, Bereichsmediane mit linearer Interpolation, lineare Regression.

Mit den gemessenen Daten als Input war das Modell in der Lage den Wasserstand beim Greifensee (Station 2082) sowie den Abfluss bei Wuhrbrücke (Station 531) sehr gut zu simulieren.

Wasserstand (Greifensee - 2082):

- Kalibration (1995 - 2005): NSE = 0.96, DV% = -2.1, RMSE = 0.04 m
- Validation 1 (1981 - 1994): NSE = 0.93, DV% = -1.0, RMSE = 0.05 m
- Validation 2 (2006 - 2019): NSE = 0.94, DV% = 1.3, RMSE = 0.05 m

Abfluss (Glatt Wuhrbrücke - 531):

- Kalibration (1995 - 2005): NSE = 0.98, DV% = 0.6, RMSE = 0.41 m³/s
- Validation 1 (1981 - 1994): NSE = 0.98, DV% = 2.1, RMSE = 0.43 m³/s
- Validation 2 (2006 - 2019): NSE = 0.97, DV% = 0.6, RMSE = 0.46 m³/s

Der Greifenseezufluss Aabach bei Nideruster (q_{554}) wurde zusätzlich mit einem Linearspeicher (Formel (6)) gedämpft, um den Effekt des Pfäffikersees zu berücksichtigen. Dafür wurde ein k -Wert von 5.78 bestimmt.

Bis zur Abflussmessstation in Rümliang (534) wurde dann das simple Additionsmodell verwendet (Formel (4)). Zum letzten Teileinzugsgebiet (Rheinsfelden, 2415) wurde die Abflusspartitionierung mit $p = 0.75$ angewandt (Formel (5)).

3.7.3 Töss

Das Routing Modell der Töss (Abbildung 3.6) bauchte keine Linearspeicher, da keine Seen im Flusseinzugsgebiet vorhanden sind. Zu den Stationen 520 (Töss Rämismühle) und 518 (Töss Wülflingen) wurde die Abflusspartitionierung (Formel (5)) mit $p = 0.89$ und $p = 0.84$ angewandt. Bei den restlichen Stationen wurde das simple Additionsmodell (Formel (4)) verwendet.

Basierend auf einer Untersuchungsstudie «Untersuchung der Hydrologie an der Töss und an der Eulach» der Firma SoilCom (Margreth and Kaderli, 2021) wurden weitere Anpassungen vorgenommen. Anthropogene Einflüsse mit Wasserentnahmen (z.B. für Trinkwasser) und Wasserrückgaben (z.B. via Kläranlagen) innerhalb des Flusseinzugsgebiets wurden als Durchschnittswerte (ohne Berücksichtigung der Saisonalität) in den betroffenen Teileinzugsgebieten bei allen simulierten Werten subtrahiert oder addiert (Tabelle 3.2).

An den meisten Messstationen im Einzugsgebiet fliesst ein Teil des Abflusses unterirdisch in Form von Grundwasser (siehe Margreth and Kaderli, 2021). Dieser Teil wird von PREVAH als Oberflächenwasser (also Abfluss) betrachtet, da die lokale Untergrundgeologie nicht berücksichtigt wird. Um einen besseren Vergleich der gemessenen Daten mit den simulierten Werten machen zu können, wurden bei allen gemessenen Werten des Töss Flusseinzugsgebiets die ungefähren Grundwasservorkommen addiert (Tabelle 3.2). Zudem sind die gemessenen Daten der meisten Stationen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da die P-Q Beziehungen nicht regelmässig und nicht in allen Abflussbereichen (Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser) durchgeführt werden, die Messtandorte teils nicht ideal liegen, Geschiebetransport nicht berücksichtigt wird usw. (Margreth and Kaderli, 2021). Bei den Stationen Töss Wülflingen und Töss Freienstein wurden für diese Studie von der Firma SoilCom Korrekturfaktoren für die P-Q Beziehungen zur Verfügung gestellt (siehe Margreth and Kaderli, 2021). Die gemessenen Abflusswerte bei Töss Wülflingen und Töss Freienstein wurden entsprechend korrigiert.

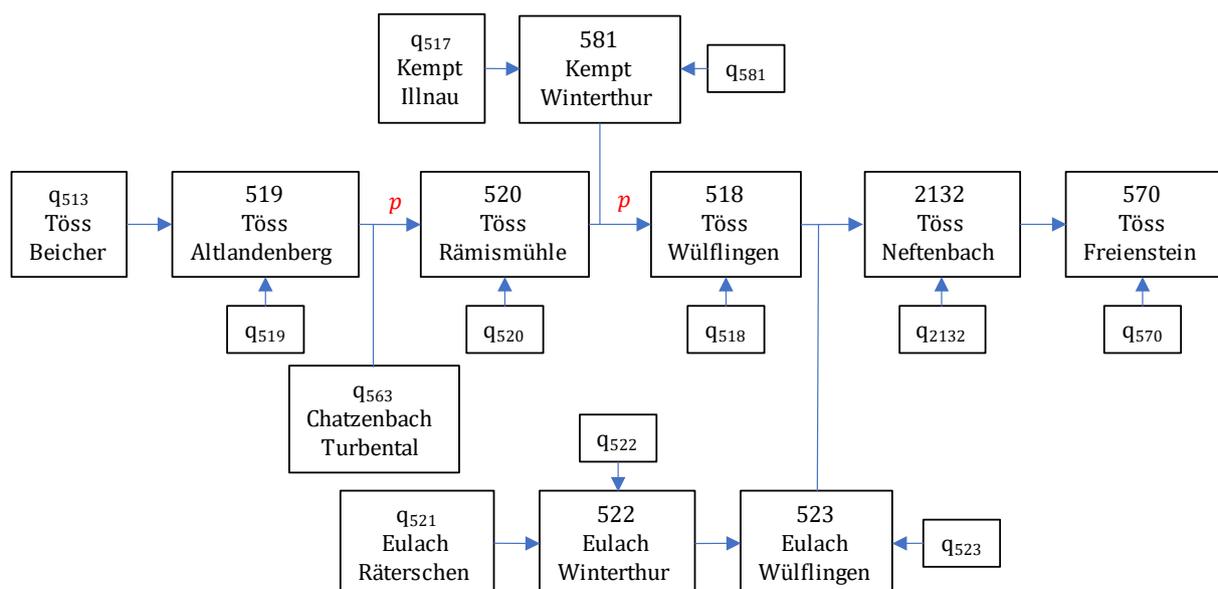


Abbildung 3.6 Routing Konzept verwendet für die Simulation des Abflusses der Töss. Die Nummern repräsentieren Messstationsnummern, q steht für den Abfluss, der innerhalb des Teileinzugsgebietes entsteht (Gebietsabfluss) und das rote p eine Abflusspartitionierung über zwei Tage.

Tabelle 3.2 Anthropogene Wasserentnahmen und Wasserrückgaben sowie ungefähre Grundwassermengen bei den Teileinzugsgebieten der Töss (heruntergerechnet von m^3 pro Jahr, ohne die Saisonalität zu berücksichtigen).

Teileinzugsgebiet	Wasserentnahmen (-), Wasserrückgaben (+) [m^3/s]	Grundwasser unterhalb der Messstationen [m^3/s]
Töss Beicher	-	?
Töss Altlandenberg	-0.030	0.468
Chatzenbach Turbenthal	-	?
Töss Rämismühle	-0.039	0.432
Kempt Illnau	-0.005	0.032
Kempt Winterthur	+0.030	0.009
Töss Wülflingen	-0.492	0
Eulach Räterschlen	-0.004	0.012
Eulach Winterthur	-0.074	0.083
Eulach Wülflingen	-0.027	0.097
Töss Neftenbach	+0.555	0
Töss Freienstein	-0.001	0.067

Die Abflussmessstation der Töss bei Neftenbach (BAFU) wurde als zuverlässig eingestuft (Margreth and Kaderli, 2021) weshalb die Modelle (PREVAH in Kombination mit dem Routing Modell) schliesslich basierend auf dieser Station kalibriert und validiert wurden.

3.7.4 Furtbach

Der Furtbach ist ein sehr kleines Einzugsgebiet und wurde deshalb für die Simulation in PREVAH in nur zwei Teileinzugsgebiete aufgeteilt (Katzensee und Furtbach bei Würenlos; Abbildung 2.1). Diese wurden mit dem Additionsmodell (Formel (4)) verknüpft, um den Abfluss des Furtbachs bei Würenlos zu erhalten (Abbildung 3.7). Da keine Abflussmessungen beim Katzensee verfügbar sind (nur Wasserstandmessungen) und die simulierten Seeabflusswerte nicht validiert werden konnten, wurde der Furtbach in dieser Studie bei den Auswertungen als ein Einzugsgebiet (bei Würenlos) ohne Teileinzugsgebiete betrachtet.

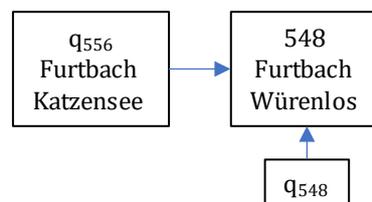


Abbildung 3.7 Routing Konzept verwendet für die Simulation des Abflusses des Furtbachs. Die Nummern repräsentieren Messstationsnummern und q steht für den Abfluss, der innerhalb des Teileinzugsgebietes entsteht (Gebietsabfluss).

3.7.5 Zürichsee und Limmat

Für die Berechnung des Wasserdargebots im Zürichsee (Wasserstand und Abfluss) wurde das hydrodynamische Modell MIKE11, das auch vom BAFU verwendet wird, eingesetzt. MIKE11 wurde vom Dänisch Hydraulischen Institut (DHI WASY) entwickelt und ist ein 1D Routing Modell (DHI, 2004). Der Abfluss des Walensees (der via Linthkanal ein Zufluss des Zürichsees ist) wurde ebenfalls mit MIKE11 bestimmt. Wie für die zuvor beschriebenen Einzugsgebiete wurde der Gebietsabfluss zuerst von PREVAH simuliert und als Input für das Routingmodell (hier MIKE11) verwendet (siehe auch Abschnitt 3.4). Beim Walensee wurden die kompletten Seezuflüsse (Flüsse, Bäche, Oberflächenabfluss, Boden- und Grundwasser) mit PREVAH berechnet. Beim Zürichsee wurden alle Seezuflüsse mit Ausnahme des Abflusses aus dem Walensee mit PREVAH berechnet. Der Walenseeabfluss wurde direkt aus MIKE11 übernommen (Abbildung 3.8). Die Inputs wurden

dann für die hydrodynamische Modellierung der Wasserstands-Szenarien mit MIKE11 verwendet. Das hydrodynamische Modell ist für die grossen Schweizer Fließgewässer und Seen aufgesetzt und bildet die hydraulischen Vorgänge (z.B. Abfluss Walensee) sowie die Reguliervorschriften von Wehren (z.B. des Lettenwehrs bei Zürich) exakt ab. Für die Erstellung der Abflussszenarien in den Zukunftsperioden wurden die Regulierungsvorschriften der Wehre nicht angepasst und von der Referenzperiode übernommen.

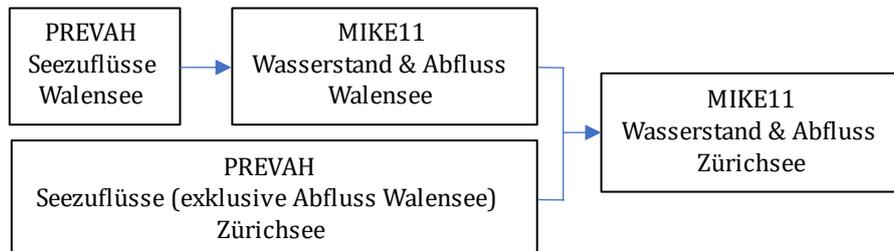


Abbildung 3.8 Routing Konzept verwendet für die Simulation des Wasserstands und des Abflusses des Zürichsees.

4 Auswertungen

4.1 Kontrolle der Abflussszenarien

Als Kontrolle der Abflussszenarien wurden deren Werte der Referenzperiode, separiert nach RCP, mit der Kontrollsimulation (CTRL) und den Beobachtungen verglichen (siehe Abschnitt 5.3). Zur Visualisierung wurden die Abflussszenarien als Boxplots sowie CTRL (rot) und die Beobachtungen (blau) als horizontale Linien dargestellt (eine horizontale Linie entspricht einem Boxplot mit nur einem Wert). Wenn das hydrologische Modell und das Routing Modell perfekt wären (die Realität 100 % wiedergeben könnten), so wären die CTRL Linien und die Linien der Beobachtungen identisch. Wenn die Klimamodelle perfekt wären (sie das Klima 100 % realitätsgetreu abbilden könnten), so gäbe es keine Variabilität in den Boxplots und diese würden auch eine Linie darstellen. Je kleiner der Boxplot also ist, desto kleiner ist auch die Klimamodellbedingte Unsicherheit. Je näher die Linie der Kontrollsimulation den Boxplots ist, desto besser waren die Klimamodelle in der Lage, das Klima der Referenzperiode zu beschreiben. Gut ist es also, wenn die CTRL-Linie sich mit den Boxplots der drei RCPs überlappt. Ein Direktvergleich der Beobachtungen mit den Abflussszenarien darf nicht gemacht werden, da so unterschiedliche Dinge betrachtet würden!

- Vergleich der Beobachtungen (blaue Linie) mit CTRL (rote Linie) beantwortet die Frage: Wie gut sind das hydrologische Modell und die Routing Modelle in der Referenzperiode in der Lage den beobachteten Abfluss wiederzugeben / zu simulieren?
- Vergleich der Abflussszenarien (Boxplots) mit CTRL (rote Linie) beantwortet die Frage: Wie gut sind die CH2018 Klimadaten bezüglich Abflusssimulation im Vergleich zur Abflusssimulation mit gemessenen Meteorodaten?

4.2 Zukünftiges Wasserdargebot

Aus den berechneten Abflussszenarien wurden die relativen Abflussveränderungen (bei den Seen die Wasserstandveränderungen) von der jeweiligen Zukunftsperiode zur Referenzperiode der Monats- und Jahresmittelwerte berechnet und als Boxplots dargestellt (siehe Abschnitt 5.4, jeweils Teil (a) der Abbildungen). Dabei wurde nach den drei Zukunftsperioden und den RCPs separiert. Zusätzlich wurden die Mediane davon (horizontale Linie der Boxplots) in einer Tabelle gelistet (Tabelle 5.2). Wenn 75 % oder mehr der Modellketten dasselbe Vorzeichen hatten, wurde der Medianwert mit einem * gekennzeichnet. Bei der Betrachtung der Boxplots ist dies meist der Fall, wenn der Interquartilbereich (Box des Boxplots) komplett unter- oder oberhalb der Nulllinie liegt. Bei einer Vorzeichenübereinstimmung von 100 % wurden die Werte mit ** gekennzeichnet. Gekennzeichnete Werte sind robuster und deshalb ist die Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit des Trends (Abflussabnahme / Abflusszunahme) grösser. Diese Methode der Übereinstimmung der Modelltrends (hier Vorzeichenübereinstimmung) wurde bereits erfolgreich von Brunner et al. (2020) verwendet. **Im Folgenden wird eine Vorzeichenübereinstimmung von 75 % oder mehr auch VZ_{75} genannt, eine Vorzeichenübereinstimmung von 100 % VZ_{100} .** Wichtig zu bemerken ist hier, dass bei der Betrachtung der Medianwerte in der Tabelle der Unsicherheitsbereich der Modellketten (Spannweite der Boxplots) nicht vergessen gehen darf!

Um dem Wunsch des Auftraggebers von absoluten Abflusswerten gerecht zu werden, wurden zwei weitere Tabellen erstellt (Abschnitt 5.4). Zum einen die gemessenen Monats- und Jahresmittelwerte der Referenzperiode (bei der Töss wurden die korrigierten Messwerte verwendet, jedoch ohne die abgeschätzten Grundwasserflüsse; Tabelle 5.3), zum anderen berechnete mögliche zukünftige Abflussmediane (bei den Seen Medianwasserstände), ohne dabei die Unsicherheitsbandbreite anzugeben (Tabelle 5.4). Dafür wurden die Mediane der relativen Veränderungen der Monats- und Jahresmittelwerte von Tabelle 5.2 mit den gemessenen Mittelwerten der Referenzperiode aus Tabelle 5.3 verrechnet. Die WSL warnt hier ausdrücklich und empfiehlt diese Werte lediglich als groben Trend anzuschauen. Die in den Modellketten vorhandenen Unsicherheiten

(vgl. auch mit den Boxplots in Abschnitt 5.4) dürfen bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 5.4 nicht vergessen gehen!

Anschliessend zu den Boxplots wurden noch Perzentile in täglicher Auflösung für die Referenzperiode und die drei Zukunftsperioden berechnet (Abschnitt 5.4, jeweils Teil (b) der Abbildungen). Es wurden die Mediane der Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q_{10} , q_{50} , q_{90}) pro RCP, separiert nach Zeitperiode, für alle Tage im Jahr (1 - 365) dargestellt. Hier muss beachtet werden, dass die Unsicherheiten nicht abgebildet werden, da für eine bessere Übersicht nur die Median-Modellketten, und nicht alle Modellketten dargestellt wurden. Für die Berechnung der Tageswerte wurde ein sogenannter «Running-Window»-Ansatz verwendet, um die Werte robuster gegen Ausreisser zu machen. Für jeden betrachteten Tag des Jahres wurden die Werte von 15 Tage vorher bis 15 Tage nachher berücksichtigt (der Wert am 16.01. zum Beispiel wurde aus allen Werten vom 01.01. bis am 31.01. über alle 30 Jahre der betrachteten Periode berechnet). q_{10} repräsentiert eher tiefere Abflüsse/Wasserstände (Abfluss/Wasserstand, der an 10 % der Tage im Jahr, im 30 Jahresdurchschnitt, unterschritten wird), q_{50} den Medianabfluss/Medianwasserstand (Abfluss/Wasserstand, der an 50 % der Tage im Jahr, im 30 Jahresdurchschnitt, unterschritten wird) und q_{90} eher hohe Abflüsse/Wasserstände (Abfluss/Wasserstand, der an 90 % der Tage im Jahr, im 30 Jahresdurchschnitt, unterschritten wird). q_{10} und q_{90} sind keine Masse für Niedrig- oder Hochwasser. Bei diesen Perzentil-Darstellungen sollen die Veränderungen zwischen den Zeitperioden angeschaut werden und nicht den absoluten Werten vertraut werden (eine Erklärung dafür findet sich in Abschnitt 5.3).

Der Grund für die Wahl der 10 % und 90 % Perzentile für Aussagen zu den tiefen und hohen Abflüssen/Wasserständen liegt an den hohen Unsicherheiten des hydrologischen Modells, der Routing Modelle und der Klimamodelle (siehe Abschnitt 5.3). Die Abflusswerte/Wasserstände bei q_{10} und q_{90} sind robuster als die Abflusswerte/Wasserstände der typischen Perzentile q_{05} und q_{95} , da dieser Bereich durch die Modelle besser abgebildet werden konnte (siehe auch Abschnitt 5.5).

Wichtig zu beachten bei den Monatsmittelwerten, den Jahresmittelwerten und den Perzentilen ist, dass immer Werte aus 30-Jahresperioden berechnet wurden (alle vier Zeitperioden haben eine Zeitspanne von 30 Jahren). Das 30-Jahresmittel macht die Werte generell robuster gegen Ausreisser, es gehen jedoch Informationen zur Interannualität (Variabilität der Abflusswerte/Wasserstände zwischen den Jahren in den entsprechenden Zeitperioden) verloren.

4.3 Veränderung des Niedrigwassers

Alle in dieser Studie verwendeten Modelle (PREVAH und Routing Modelle) wurden so kalibriert, dass sie das Wasservolumen generell (DV möglichst nahe bei 0 über einen längeren Zeitraum) bestmöglich simulieren konnten. Es wurde dabei nicht speziell auf das Timing oder das Volumen von Niedrig- oder Hochwasserereignissen geschaut. Aussagen zum Niedrigwasser sind also mit Vorsicht zu machen. Aus diesem Grund wurden auch q_{10} und q_{90} berechnet (Abschnitt 4.2) und nicht q_{05} und q_{95} , wie dies in anderen Studien oft gemacht wird. Auf Wunsch des Auftraggebers wurden aber dennoch Niedrigwasseranalysen erstellt. Diese erlauben es dem Auftraggeber abzuschätzen in welchen Monaten und, zumindest grob, in welcher Grössenordnung die tiefen Abflüsse künftig liegen könnten.

Als alternative Art der Darstellung der Abflussszenarien und zur besseren Sichtbarkeit der Veränderungen im Niedrigwasserbereich wurden Dauerkurven erstellt (Abschnitt 5.5). Diese wurden nach Zeitperiode und RCP separiert. Bei den Abbildungen wurden ebenfalls die Dauerkurve der Kontrollsimulation (CTRL) und die Dauerkurve der Beobachtungen dargestellt, um auf die vorhandenen Unsicherheiten hinzuweisen (siehe auch Abschnitt 5.3).

Als Information zum Niedrigwasser wurde Q_{347} verwendet (Abschnitt 5.5). Q_{347} beschreibt in der Schweiz den Abfluss, der an 347 Tagen im Jahr (für mindestens zehn Jahre) überschritten wird (respektive an den restlichen Tagen unterschritten wird). Dieser entspricht dem 5 % Perzentil

aller Abflusswerte der betrachteten Zeitperiode (q05; Rössler *et al.*, 2019). Hier wurde q05 über die jeweiligen 30 Jahre der Zeitperioden (1981 – 2010 / 2020 – 2049 / 2045 – 2074 / 2070 – 2099), separiert nach RCP, berechnet. Die Resultate wurden als Boxplots dargestellt. Wie bei den Monatsmittelwerten wurde die relative Veränderung der betrachteten Zeitperiode zur Referenzperiode angegeben. Als Vergleich der Grössenordnung der Veränderungen wurden zudem die Veränderungen der Jahresmittelwerte daneben aufgeführt.

Analog zu den Monatsmittelwerten wurden auch für Q_{347} die Mediane der relativen Veränderungen der Zukunftsperiode [%], die gemessenen Q_{347} der Referenzperiode und die verrechneten Werte in einer Tabelle dargestellt (Tabelle 5.5). Für die relativen Werte in der Tabelle wurde dasselbe System (nur der Wert oder mit * oder ** hinter den Werten) für die Übereinstimmung der Vorzeichen der Modellketten eines RCPs verwendet (im Folgenden auch VZ_{75} und VZ_{100} genannt). Die WSL warnt hier ausdrücklich und empfiehlt diese Werte lediglich als groben Trend anzuschauen. Die in den Modellketten vorhandenen Unsicherheiten (vgl. auch mit den Boxplots in Abschnitt 5.4) dürfen bei der Betrachtung der Werte in allen Tabellen nicht vergessen gehen!

5 Resultate

5.1 Zusammenfassung

Generell wurde in den Modellen (PREVAH in Kombination mit den Routing Modellen) eine gute Performance erreicht. Die Modelle waren in der Lage die Abflussregime und die saisonale Variabilität der Flusseinzugsgebiete abzubilden. Da es in der monatlichen Betrachtung jedoch Abweichungen der Kontrollsimulation von den Beobachtungen und der Abflussszenarien von der Kontrollsimulation gibt, darf den absoluten, simulierten Werten der Abflussszenarien nicht vertraut werden. Es wurden deshalb die relativen Veränderungen der Zukunftsperioden im Vergleich zur Referenzperiode dargestellt.

In allen Einzugsgebieten sind bis Ende Jahrhundert im Winter höhere und im Sommer tiefere Abflüsse zu erwarten. Bei der Reppisch, der Glatt, der Töss, dem Furtbach, der Sihl und der Thur ist der Trend zu einer Zunahme der mittleren Abflüsse im Januar eindeutig. In den anderen Winter- und teils Frühlingsmonaten ist der Trend nicht in allen Einzugsgebieten gleich stark ausgeprägt. Von Juli bis September ist damit zu rechnen, dass die mittleren Abflüsse zurück gehen werden. Je nach Einzugsgebiet ist ein Rückgang bis im Oktober sichtbar. Bei der Limmat, dem Rhein und der Reuss sind die gleichen eindeutigen Abflussveränderungen sichtbar, jedoch ist auch im Februar mit einer eindeutigen Zunahme der mittleren Abflüsse zu rechnen.

Generell finden saisonale Wasserumverteilungen innerhalb des Jahres statt. Eine deutliche Veränderung in den Jahresmittelwerten ist nicht zu erwarten. Bei der Sihl, der Limmat und der Reuss ist allerdings bis Ende Jahrhundert mit tieferen Jahresmittelwerten zu rechnen (weniger Wasser vorhanden als in der Referenzperiode).

Bei der Limmat, dem Rhein und der Reuss ist damit zu rechnen, dass sich das Median-Abflussminimum innerhalb des Jahres vom Winter in den Sommer verschiebt.

Die eher tiefen (q10) und eher hohen (q90) Abflüsse verändern sich sehr ähnlich wie die Medianabflüsse (q50). Sie nehmen im Winter zu und im Sommer ab. Bei Q_{347} ist in allen Einzugsgebieten bis Ende Jahrhundert eher mit einer Abnahme zu rechnen.

5.2 Modellperformance Kontrollsimulation

Hier wird in der Referenzperiode die Kontrollsimulation (CTRL; PREVAH und Routing Modell verknüpft) mit den beobachteten Daten verglichen (wenn verfügbar ab 1981, ansonsten ab 1986).

5.2.1 Reppisch

Bei der Reppisch wurde eine gute Modellperformance in der Zeitperiode von 1986 - 2016 erreicht (Tabelle 5.1). Die *NSE* war in allen Teileinzugsgebieten relativ hoch und der Volumenfehler nahe bei 0. Der *RMSE* war in Dietikon mit $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ eher hoch (vgl. auch mit dem beobachteten Jahresmittelwert von $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, Tabelle 5.3).

5.2.2 Glatt

Bei der Glatt variierte die Modellperformance von 1981 – 2016 stark in Abhängigkeit des Standorts (Tabelle 5.1). Oberhalb des Greifensees (554, 527, 532) war sie grundsätzlich schlechter als unterhalb. Oberhalb ist eher zu viel Wasser im System (hohe Volumenfehler), unterhalb stimmt die Grössenordnung. Die Volumenfehler oberhalb des Greifensees kompensieren sich in etwa, wenn man die Fläche der zugehörigen Einzugsgebiete miteinbezieht (Überschätzung bei bekannten Zuflüssen, Unterschätzung bei den unbekanntenen Zuflüssen). Der Seestand des Greifensees

konnte zufriedenstellend simuliert werden ($NSE = 0.85$, $RMSE = 7$ cm). Bis Dübendorf ist die Modellperformance sehr gut ($DV = 1.5$ %, $NSE = 0.854$). In Rümlang ist jedoch eine deutliche Verschlechterung sichtbar ($DV = 6.0$ %, $NSE = 0.761$). Diese Verschlechterung könnte an einer Versickerung des Flusswassers ins Grundwasser liegen. Das Untergrundgestein ist vor und nach Rümlang mehrheitlich undifferenziertes glazilakustrisches und glazifluviatiles Sediment, Schotter und Moränenmaterial (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2019), in denen Wasser leicht versickern kann. Somit wäre an der Messstation in Rümlang weniger Wasser an der Oberfläche vorhanden (es wird weniger gemessen als eigentlich vorhanden ist). Das Modell kennt diese unterirdischen Flüsse allerdings nicht weshalb das Modell den Abfluss vermeintlich überschätzt (gleiches Problem wie bei der Töss). Der $RMSE$ in Rheinsfelden ist mit 2.4 m³/s jedoch noch akzeptabel (vgl. mit dem beobachteten Jahresmittelwert von 8.2 m³/s, Tabelle 5.3).

5.2.3 Töss

Bei der Töss werden alle Seitenbäche (Chatzenbach, Kempt, Eulach) vom Modell überschätzt und die Töss selbst bis Wülflingen unterschätzt (Tabelle 5.1). Die Autoren und die Firma SoilCom können sich dieses Phänomen nicht abschliessend erklären! Möglich ist jedoch, dass ein Teil mit den ungenauen Abflusswerten an den Messstationen sowie Interpolationsfehlern bei den meteorologischen PREVAH-Input Daten erklärt werden könnte.

Bei der Töss wurde für das gesamte Flusseinzugsgebiet jedoch eine gute Modellperformance in der Zeitperiode von 1986 - 2016 erreicht. In Wülflingen ist die Modellperformance der Töss akzeptabel ($DV = -6.0$ %, $NSE = 0.83$). In Neftenbach wird die Performance deutlich besser und ist als sehr gut zu beurteilen ($DV = 0.8$ %, $NSE = 0.85$). Dies liegt daran, dass wegen der vertrauenswürdigen Messwerte der Station die Modelle basierend auf dieser Station kalibriert wurden (siehe Abschnitt 3.7.3). In Töss Freienstein (Betrachtung des gesamten Flusseinzugsgebiets) ist die Modellperformance noch immer sehr gut ($DV = -1.4$ %, $NSE = 0.84$). Der $RMSE$ war in Freienstein mit 3.7 m³/s noch akzeptabel (vgl. mit dem beobachteten Jahresmittelwert von 9.0 m³/s, Tabelle 5.3). Die Töss sollte wegen den grossen Über- und Unterschätzungen in den Teileinzugsgebieten nur als Ganzes, also als Flusseinzugsgebiet (bei Freienstein) betrachtet werden.

5.2.4 Furtbach

Der Furtbach wurde durch das Modell zufriedenstellend simuliert. Es unterschätzte das Volumen um 1.6 % und die NSE war mit 0.77 relativ hoch (Tabelle 5.1). Der $RMSE$ mit 0.3 m³/s war jedoch eher hoch (vgl. mit dem beobachteten Jahresmittelwert von 0.7 m³/s, Tabelle 5.3).

5.2.5 Limmat

Der Wasserstand im Zürichsee und der Abfluss in der Limmat bei Zürich wurden sehr gut simuliert (Tabelle 5.1). Die NSE war bei beiden mit 0.98 sehr hoch und der Volumenfehler mit 0 % inexistent. Ein $RMSE$ von 2 cm beim Wasserstand des Zürichsees und 6 m³/s bei der Limmat ist klein (vgl. mit dem beobachteten Jahresmittelwert der Limmat von 88 m³/s, Tabelle 5.3).

Tabelle 5.1 Modellperformance (PREVAH & Routingmodell) als NSE, DV und RMSE pro Teileinzugsgebiet (Standort) für die Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach und Limmat. Gegeben ist ebenfalls die Nummer der entsprechenden Abflussmessstation (Stationsnummer; BAFU-Stationen sind kursiv markiert).

Standort	Stationsnummer	NSE	DV [%]	RMSE [m ³ /s], bei Wasserstand [m]
Reppisch				
Abfluss Türlerseesee	561	0.67	0.0	0.1
Reppisch Birmensdorf	541	0.73	1.9	0.3
Reppisch Dietikon	572	0.78	1.8	0.7
Glatt				
Aabach Nideruster	554	0.34	5.2	1.0
Aabach Mönchaldorf	527	0.77	11.1	0.6
Dorfbach Maur	532	0.61	25.5	0.0
Unbekannter Seezufluss	-	0.62	-17.4	1.1
Greifensee Wasserstand	2082	0.85	-1.8	0.07
Glatt Wuhrbrücke	531	0.85	0.8	1.0
Glatt Dübendorf	533	0.85	1.5	1.1
Glatt Rümlang	534	0.76	6.0	2.1
Glatt Rheinsfelden	2415	0.80	8.6	2.4
Töss				
Töss Beicher	513	0.62	-21.5	0.5
Töss Altlandenbergr	519	0.78	-11.5	1.3
Chatzenbach Turbenthal	563	0.34	68.4	0.1
Töss Rämismühle	520	0.81	-8.2	2.1
Kempt Illnau	517	0.73	21.1	0.5
Kempt Winterthur	581	0.79	13.0	0.7
Töss Wülflingen	518	0.83	-6.0	3.2
Eulach Rätterschen	521	0.66	22.2	0.3
Eulach Winterthur	522	0.36	50.2	0.8
Eulach Wülflingen	523	0.29	70.4	0.9
Töss Neftenbach	2132	0.85	0.8	3.5
Töss Freienstein	570	0.84	-1.4	3.7
Furtbach Würenlos	548	0.77	-1.6	0.3
Limmat				
Zürichsee Wasserstand	2209	0.98	0.0	0.02
Limmat Zürich	2099 - 2176	0.98	0.0	6.0

5.3 Kontrolle der Abflussszenarien (Referenzperiode)

Die Abflussregime und der Vergleich der Abflussszenarien mit der Kontrollsimulation (CTRL) der Referenzperiode waren in den Teileinzugsgebieten eines Flusseinzugsgebiets sehr ähnlich. Deshalb wurden im Folgenden nur die Flusseinzugsgebiete als Ganzes diskutiert (Reppisch, Glatt, Töss, etc.) und nicht jedes Teileinzugsgebiet separat.

Die Reppisch, die Glatt, die Töss, der Furtbach, die Sihl und die Thur haben keinen glazialen Einfluss, wohingegen die Limmat, der Rhein und die Reuss Gletscher im Kopfeinzugsgebiet haben und entsprechend Schmelzwasser führen (jedoch viel weniger als z.B. die Rhone im Wallis oder der Inn im Engadin, siehe auch [Hydro-CH2018: Szenarien bis 2100](#) des HADES). Dies ist klar am Abflussregime sichtbar (Abbildung 5.1, Abbildung 5.2). Glazial geprägte Gebiete haben nur einen Peak, der erst spät im Frühling oder Anfang Sommer auftritt. Einzugsgebiete im Mittelland erreichen den Peak Abfluss bereits früher im Jahr und es können mehrere Höhen und Tiefen auftreten (Weingartner and Aschwanden, 1992).

Das Abflussregime und die Variabilität der Saisonalität konnte in allen Einzugsgebieten gut reproduziert werden (vgl. das Muster über das Jahr von CTRL mit den Beobachtungen und von CTRL mit den Abflussszenarien in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2). Eine absolute Übereinstimmung über alle Monate konnte in keinem Einzugsgebiet erreicht werden, wäre aber auch nicht realistisch, da alle verwendeten Modelle Unsicherheiten mit sich bringen. Die Abflussszenarien waren jedoch meist in der richtigen Grössenordnung (vgl. CTRL mit den Abflussszenarien). Am besten war die Übereinstimmung beim Furtbach und der Thur. Auf jährlicher Basis (Boxplots mit Kennzeichnung «Jahr» in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2) war eine gute Übereinstimmung (vgl. CTRL mit den Abflussszenarien) bei der Reppisch, dem Furtbach, der Thur, des Rheins (Neuhausen und Rekingen) und der Reuss zu erkennen. Bei der Glatt und der Sihl überschätzen die Abflussszenarien die Kontrollsimulation, bei der Töss und der Limmat wurden sie unterschätzt.

Die Übereinstimmungen einzelner Monate waren besser als bei anderen (vgl. CTRL mit den Abflussszenarien). Dies weist klar auf die verbundenen Unsicherheiten der Klimamodelle hin. Die WSL kann hierbei keine direkten Verbesserungen vornehmen. Mit neuen Klimamodellketten in Zukunft könnte die Übereinstimmung jedoch besser werden. Mit zusätzlichem Aufwand könnte die WSL eventuell die Kontrollsimulation näher an die Beobachtungen bringen (z.B. unter Berücksichtigung anthropogener Wasserentnahmen und Rückgaben, der Wasserkraftnutzung etc.), was dann auch die absoluten Werte der Abflussszenarien verbessern würde. Zudem dürften die Messwerte an vielen Station im Kanton Zürich mit hohen Unsicherheiten behaftet sein (Margreth and Kaderli, 2021) weshalb den blauen Linien in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 ebenfalls nicht zu viel Vertrauen geschenkt werden darf. Wichtig für die Auswertungen mit den Abflussszenarien ist deshalb, und auch wegen der teilweisen Unterschiede zwischen CTRL und den Abflussszenarien, dass absoluten Abflusswerten (von Abflussszenarien) nicht zu viel Glauben geschenkt werden darf. Vertrauenswürdiger sind Vergleiche zwischen den Zukunftsperioden (2035, 2060, 2085) und der Referenzperiode, also zum Beispiel die prozentuale Zu-/Abnahme des Abflusses in Bezug zur Referenzperiode (im Falle von Wasserständen werden die absoluten Veränderungen angegeben, da ein prozentualer Vergleich bei der Einheit m ü.M. keinen Sinn macht). In Abschnitt 5.4 werden deshalb solche Vergleiche der Monats- und Jahresmittelwerte präsentiert.

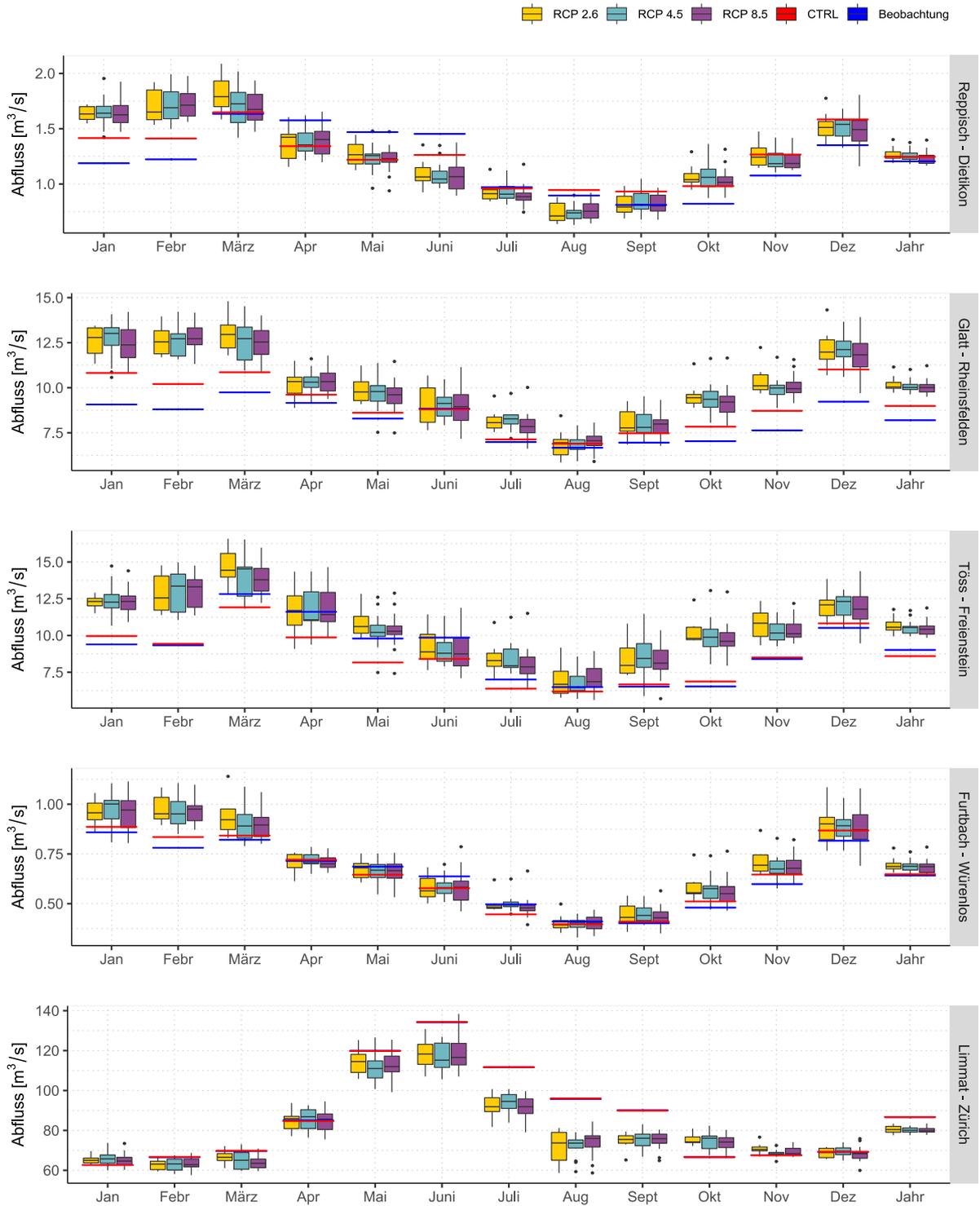


Abbildung 5.1 Vergleich der Abflusszenarien (Abflusssimulation mit den CH2018 Szenarien in der Referenzperiode), der Kontrollsimulationen (CTRL; Abflusssimulation mit beobachteten Daten) und der beobachteten Werte in der Referenzperiode für die Reppisch bei Dietikon, die Glatt bei Rheinsfelden, die Töss bei Freienstein, den Furtbach bei Würenlos und die Limmat bei Zürich. Vorsicht: die y-Achse hat jeweils unterschiedliche Dimensionen!

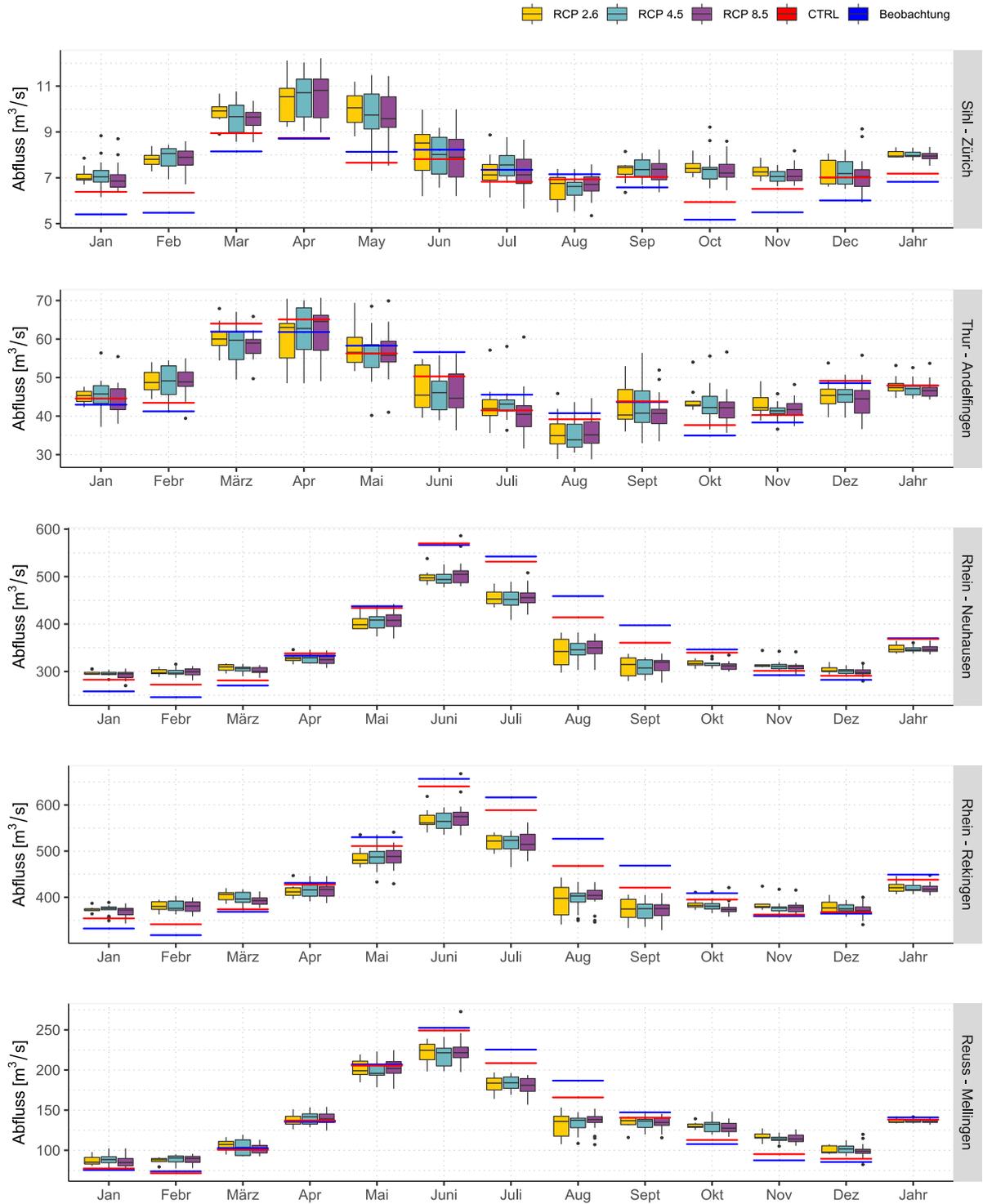


Abbildung 5.2 Vergleich der Abflusszenarien (Abflusssimulation mit den CH2018 Szenarien in der Referenzperiode), der Kontrollsimulationen (CTRL; Abflusssimulation mit beobachteten Daten) und der beobachteten Werte in der Referenzperiode für die Sihl bei Zürich, die Thur bei Andelfingen, den Rhein bei Neuhausen und Rekingen sowie die Reuss bei Mellingen. Vorsicht: die y-Achse hat jeweils unterschiedliche Dimensionen!

5.4 Zukünftiges Wasserdargebot

In diesem Abschnitt werden die Abflussszenarien der Flusseinzugsgebiete präsentiert. Zusätzlich wurden auf Wunsch des Auftraggebers die Veränderungen der Wasserstände von Greifensee und Zürichsee sowie bei der Glatt der Standort bei Dübendorf mitdiskutiert.

Das mittlere Wasserdargebot ist starken Schwankungen der Modellketten ausgesetzt weshalb die Betrachtung von VZ_{75} und VZ_{100} (*/** Labels in Tabelle 5.2 und Tabelle 5.5) essenziell ist.

- **VZ_{75}** : die Vorzeichenübereinstimmung der Modellketten, separiert nach RCP, war 75 % oder höher.
 - RCP 2.6: 06 von 08 Modellketten haben das gleiche Vorzeichen
 - RCP 4.5: 10 von 13 Modellketten haben das gleiche Vorzeichen
 - RCP 8.5: 14 von 18 Modellketten haben das gleiche Vorzeichen
- **VZ_{100}** : die Vorzeichenübereinstimmung der Modellketten, separiert nach RCP, war bei 100 %.

Für alle Einzugsgebiete wurde zuerst die Veränderung der Abflüsse der Monats- und Jahresmittelwerte beschrieben. Danach folgen die eher tiefen Abflüsse (q_{10}) und die Medianabflüsse (q_{50}). Am Schluss werden die eher hohen Abflüsse (q_{90}) aufgeführt.

5.4.1 Reppisch

Die Veränderungen der mittleren Abflüsse im Vergleich zur Referenzperiode bei der Reppisch in Dietikon sind unter RCP 2.6 am schwächsten und unter RCP 8.5 am stärksten ausgeprägt (Abbildung 5.3a; Tabelle 5.2). Das grobe Muster ist über alle drei RCPs gleich. Eine Abflusszunahme im Winter und eine Abflussabnahme im Sommer. Im Januar ist eine leichte Abflusszunahme zu erwarten. Unter allen drei RCPs ist die Vorzeichenübereinstimmung der Modellketten Ende Jahrhundert mindestens 75 %. Im März ist eine leichte Abflussabnahme zu erwarten (unter RCP 2.6 VZ_{75} bei allen Zeitperioden). Interessant ist der Monat Mai. Unter RCP 2.6 sind für alle Zeitperioden leicht reduzierte Abflüsse zu erwarten, unter den RCPs 4.5 und 8.5 jedoch eine Abflusszunahme. Von Juli bis Oktober ist eine Abflussabnahme zu erwarten (unter RCP 4.5 und 8.5 ist diese grösser). In diesen Monaten ist VZ_{75} für die meisten Werte gegeben. Im September wurde unter RCP 4.5 für die nahe und ferne Zukunft sowie unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft sogar VZ_{100} erreicht. Die stärkste Abflussveränderung ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im September zu erwarten. Ein Abflussrückgang von 39 % (VZ_{100}) in der Reppisch bedeutet eine Reduktion des mittleren Abflusses von $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 5.3) auf $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 5.4). Bei den mittleren jährlichen Abflüssen sind die Veränderungen deutlich kleiner und eine generelle Tendenz zur Zu- oder Abnahme ist nicht ersichtlich (Abbildung 5.3a, Tabelle 5.2). Nur unter RCP 2.6 für die nahe und mittlere Zukunft und unter RCP 4.5 für die mittlere Zukunft ist VZ_{75} für eine Abflussabnahme gegeben.

Bei den tieferen Abflüssen (q_{10} ; Abbildung 5.3b) sind über das Jahr dieselben Trends der Abflussveränderung erkennbar wie bei den mittleren (Abbildung 5.3a) und Medianabflüssen (q_{50} ; Abbildung 5.3b).

Bei den höheren Abflüssen (q_{90} ; Abbildung 5.3b) nimmt unter RCP 2.6 der Abfluss im Januar für alle Zukunftsperioden zu, von Februar bis April ab, im Juni kurz zu, bevor er dann bis Ende Jahr eher gleichbleibt. Unter RCP 4.5 sind tiefere Abflüsse für Juli, August und September zu erwarten. Unter RCP 8.5 zeigt sich ein ähnliches Muster wie bei den mittleren Abflüssen: eine Zunahme im Winter und Frühling, sowie eine Abnahme im Sommer und anfangs Herbst. Die sichtbaren Veränderungen bei q_{90} verstärken sich generell über die Zeit (Referenzperiode < nahe Zukunft < mittlere Zukunft < ferne Zukunft).

5.4.2 Greifensee

Bei den Veränderungen der mittleren Wasserstände beim Greifensee (Abbildung 5.4a, Tabelle 5.2) ist im Januar mit einer Wasserstandszunahme zu rechnen. Unter RCP 2.6 und 8.5 ist VZ_{75} für alle Zeitperioden und unter RCP 4.5 für die ferne Zukunft gegeben. Im März ist unter RCP 2.6 mit einer Wasserstandabnahme zu rechnen (VZ_{75} für alle Zeitperioden). Im Mai zeigt sich dasselbe Muster wie bei der Reppisch in Dietikon. Unter RCP 2.6 sind eher tiefere oder gleichbleibende Wasserstände zu erwarten (je nach Zeitperiode) wogegen unter RCP 4.5 und 8.5 eher mit höheren Wasserständen gerechnet werden muss. Von Juli bis Oktober ist eine Wasserstandabnahme zu erwarten. Diese ist unter RCP 4.5 und 8.5 stärker ausgeprägt als unter RCP 2.6. Für die meisten Werte ist VZ_{75} gegeben, bei einigen Werten im August und September sogar VZ_{100} . Im Oktober ist unter RCP 4.5 für alle Zeitperioden die Vorzeichenübereinstimmung von mehr als 75 % nicht gegeben. Die stärkste Wasserstandsveränderung ist im September unter RCP 8.5 bis Ende Jahrhundert zu erwarten und beträgt -14 cm (VZ_{100}). Dies entspricht einer Reduktion des Wasserstands von 435.17 m ü.M. (Tabelle 5.3) auf 435.03 m ü.M. (Tabelle 5.4). Bei den mittleren Jahreswasserständen ist eher mit einer leichten Abnahme zu rechnen. Unter RCP 2.6 ist VZ_{75} für die nahe und mittlere Zukunft gegeben, unter RCP 4.5 für die mittlere und unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft.

Die Veränderungen der eher tiefen Wasserstände (q_{10}) und die Medianwasserstände (q_{50} ; Abbildung 5.4b) zeigen sehr ähnliche Trends und widerspiegeln in etwa die Trends der mittleren Wasserstandsveränderungen. Unter RCP 8.5 ist Ende Jahrhundert vor allem eine Wasserstandsreduktion bei q_{10} sichtbar.

Bei den hohen Wasserständen (q_{90} ; Abbildung 5.4b) sind bis Ende Jahrhundert unter RCP 2.6 weniger starke Veränderungen zu erwarten als unter RCP 4.5 und 8.5. Unter RCP 4.5 und 8.5 ist vor allem die Reduktion im Sommer/Herbst ausgeprägt.

5.4.3 Glatt

Die Veränderungen der mittleren Abflüsse bei der Glatt in Dübendorf (Abbildung 5.5a, Tabelle 5.2) und Rheinsfelden (Abbildung 5.6a, Tabelle 5.2) sind sehr ähnlich wie bei der Reppisch in Dietikon und wie den Trends des Greifensees. Sie sind unter RCP 2.6 am geringsten und unter RCP 8.5 am stärksten ausgeprägt. Im Januar ist eine Abflusszunahme zu erwarten. Unter RCP 2.6 ist VZ_{75} für alle Zeitperioden, unter RCP 4.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft gegeben (bei Dübendorf ausserdem auch unter RCP 8.5 für die nahe Zukunft). Im März ist bei Dübendorf und Rheinsfelden unter RCP 2.6 eine Abflussabnahme zu erwarten. Wie bereits bei der Reppisch ist bei allen Zeitperioden unter RCP 2.6 VZ_{75} gegeben. Im Mai sind unter RCP 2.6 für alle Zeitperioden leicht reduzierte Abflüsse zu erwarten, unter den RCPs 4.5 und 8.5 jedoch eine Abflusszunahme. Von Juli bis September ist mit einer Abflussreduktion zu rechnen (VZ_{75} für die meisten Werte; im September bei einigen sogar VZ_{100}). An beiden Standorten ist der stärkste Abflussrückgang Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im September. In Dübendorf ist die Reduktion 43 % (VZ_{100}), in Rheinsfelden 39 % (VZ_{100}). Dies entspricht in Dübendorf einem Rückgang der mittleren Abflüsse im September von 3.9 m³/s (Tabelle 5.3) auf 2.2 m³/s (Tabelle 5.4) und in Rheinsfelden von 7.0 m³/s (Tabelle 5.3) auf 4.3 m³/s (Tabelle 5.4). Bei den mittleren jährlichen Abflüssen sind die Veränderungen an beiden Standorten klein und eine generelle Tendenz zur Zu- oder Abnahme ist nicht eindeutig (Abbildung 5.5a, Abbildung 5.6a, Tabelle 5.2).

Der Trend der Veränderungen der tiefen Abflüsse (q_{10} ; Abbildung 5.5b, Abbildung 5.6b) ist sehr ähnlich zu denjenigen der Medianabflüsse (q_{50}) und widerspiegelt in etwa die Veränderungen der Reppisch und des Greifensees.

Bei den hohen Abflüssen (q_{90} ; Abbildung 5.5b, Abbildung 5.6b) ist an beiden Standorten unter RCP 8.5 bis Ende Jahrhundert vor allem eine Zunahme in den Wintermonaten und eine Abnahme in den Sommermonaten zu erwarten. Unter RCP 2.6 und 4.5 sind diese Trends auch vorhanden, jedoch weniger eindeutig.

5.4.4 Töss

Die Veränderungen der mittleren Abflüsse bei der Töss in Freienstein (Abbildung 5.7a) sind sehr ähnlich wie bei der Glatt. Sie sind grundsätzlich unter RCP 2.6 geringer als unter RCP 8.5. Im Januar ist eine Abflusszunahme zu erwarten. Unter RCP 2.6 ist VZ_{75} für die nahe und ferne Zukunft gegeben, unter RCP 4.5 für die mittlere und ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden (Tabelle 5.2). Im März ist unter RCP 2.6 für alle Zeitperioden eine Abflussabnahme (VZ_{75}) zu erwarten. Im Mai sind, wie bei der Reppisch und der Glatt, unter RCP 2.6 für alle Zeitperioden leicht reduzierte Abflüsse zu erwarten, unter den RCPs 4.5 und 8.5 jedoch eine Abflusszunahme. Von Juli bis September ist mit einer Abflussreduktion zu rechnen (VZ_{75} für die meisten Werte; im August und September bei einigen Werten sogar VZ_{100}). Der stärkste Abflussrückgang ist unter RCP 8.5 Ende Jahrhundert im September zu erwarten und liegt bei 43 % (VZ_{100}). Dies entspricht einem Rückgang des mittleren Abflusses im September von $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 5.3) auf $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 5.4). Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist unter RCP 2.6 mit einer Abnahme zu rechnen (VZ_{75}). Unter RCP 4.5 und 8.5 ist der Trend nicht eindeutig (Abbildung 5.7a, Tabelle 5.2).

Der Trend der Medianabflüsse (q_{50}) und der tiefen Abflüsse (q_{10}) ist sehr ähnlich (Abbildung 5.7b) und widerspiegelt in etwa die Trends der mittleren Abflüsse.

Bei den hohen Abflüssen (q_{90}) ist die Tendenz erneut sehr ähnlich (Abbildung 5.7b). Unter allen RCPs ist eine Zunahme in den Wintermonaten und eine Abnahme in den Sommermonaten zu erwarten. Dieser Trend ist unter RCP 8.5 und bis Ende Jahrhundert am stärksten ausgeprägt.

5.4.5 Furtbach

Beim Furtbach in Würenlos zeigt sich dasselbe Muster wie bei der Reppisch, Glatt und Töss. Die Veränderungen der mittleren Abflüsse unter RCP 2.6 sind generell kleiner als unter RCP 8.5 (Abbildung 5.8a). Im Januar ist eine Abflusszunahme zu erwarten. Unter RCP 2.6 für alle Zeitperioden, unter RCP 4.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft ist VZ_{75} gegeben (Tabelle 5.2). Im März ist eher mit einem Abflussrückgang zu rechnen (VZ_{75} unter RCP 2.6). Im Mai ist unter RCP 2.6 die Tendenz eher bei einer Abflussreduktion, während unter RCP 4.5 und 8.5 eher mit einer Abflusszunahme zu rechnen ist. Von Juli bis Oktober ist eine Abflussreduktion zu erwarten. Bei den meisten Werten ist VZ_{75} gegeben. Wie bereits bei der Reppisch, der Glatt und der Töss ist die stärkste Abflussreduktion Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im September zu erwarten und beträgt 32 % (VZ_{100}). Dies bedeutet eine Reduktion des mittleren Abflusses von $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 5.3) auf $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 5.4). Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist kein eindeutiger Trend zur Zu- oder Abnahme vorhanden (Abbildung 5.8a, Tabelle 5.2).

Die tiefen Abflüsse (q_{10}) und die Medianabflüsse (q_{50} ; Abbildung 5.8b) haben den gleichen Trend über das Jahr wie die mittleren Abflüsse.

Bei den hohen Abflüssen (q_{90} ; Abbildung 5.8b) ist die Tendenz ebenfalls sehr ähnlich. Unter RCP 2.6 sind für die hohen Abflüsse im Januar eher höhere Werte zu erwarten, im März und April eher tiefere. Danach ist über das ganze Jahr keine grosse Veränderung zu erwarten. Unter RCP 4.5 sind im Winter generell höhere Abflüsse zu erwarten. Im März und April bleiben diese eher gleich, während im Mai und Juni wieder eher höhere Abflüsse zu erwarten sind. Im Sommer sind eher tiefere Abflüsse zu erwarten. Unter RCP 8.5 ist derselbe Trend sichtbar, jedoch stärker ausgeprägt.

5.4.6 Zürichsee

Beim Wasserstand im Zürichsee ist generell derselbe Trend zu sehen wie bei den zuvor beschriebenen Einzugsgebieten: eine Zunahme im Winter und eine Abnahme im Sommer (Abbildung 5.9a). Im Januar und Februar ist unter allen RCPs und Zeitperioden mit einer Zunahme zu rechnen. Bei allen Werten ist VZ_{75} gegeben, bei einigen sogar VZ_{100} (Tabelle 5.2). Im März ist unter RCP 4.5

und 8.5 ebenfalls eine Wasserstandzunahme zu erwarten (VZ_{75} bei allen Werten gegeben, unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft sogar VZ_{100}). Von Juli bis Oktober ist unter allen RCPs und Zeitperioden mit einer Wasserstandabnahme zu rechnen. VZ_{75} ist bei fast allen Werten gegeben, bei einigen sogar VZ_{100} . Im Dezember ist unter RCP 4.5 und 8.5 mit einer leichten Wasserstandzunahme zu rechnen (VZ_{75} gegeben für alle Werte ausser unter RCP 4.5 für die mittlere Zukunft). Die stärkste Wasserstandveränderung ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Februar mit +5 cm (VZ_{100}) sowie im August und September mit -5 cm (VZ_{100}) zu erwarten. Im Februar ist dies eine Zunahme von 405.74 m ü.M. (Tabelle 5.3) auf 405.79 m ü.M. (Tabelle 5.4), im August und September eine Abnahme von 406.03 m ü.M. (Tabelle 5.3) zu 405.98 m ü.M. (Tabelle 5.4). Bei den mittleren jährlichen Wasserständen ist keine eindeutige Veränderung zu erwarten (Abbildung 5.9a, Tabelle 5.2).

Bei den Perzentilen der Wasserstände (Abbildung 5.9b) sieht man den Einfluss des Wehrreglements sehr gut. Die Veränderungen der eher tiefen Wasserstände (q10) sind sehr ähnlich zu den Medianwasserständen (q50) und zu den mittleren Wasserständen. Unter RCP 8.5 ist bis Ende Jahrhundert damit zu rechnen, dass der Medianwasserstand auf das Niveau des q10 Wasserstands der Referenzperiode sinkt.

Die Veränderungen der hohen Abflüsse (q90) sind sehr ähnlich zu den Medianwasserständen (q50) und den eher tiefen (q10).

5.4.7 Limmat

Bei der Limmat in Zürich sind künftig ähnliche Veränderungen der mittleren Abflüsse zu erwarten wie bei den zuvor beschriebenen Einzugsgebieten, jedoch sind die Veränderungen eindeutiger und fallen höher aus (Abbildung 5.10a). Die Veränderungen sind unter RCP 2.6 am geringsten und unter RCP 8.5 am höchsten. Im Januar und Februar ist mit einer deutlichen Abflusszunahme zu rechnen. Unter allen RCPs und Zeitperioden ist VZ_{75} gegeben (Tabelle 5.2). Im Januar unter RCP 2.6 für die mittlere und ferne Zukunft und unter RCP 8.5 die ferne Zukunft, sowie im Februar unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden ist VZ_{100} gegeben. Im März ist unter RCP 2.6 eine Abflussabnahme zu erwarten, unter RCP 4.5 und 8.5 jedoch eine Abflusszunahme, im April für alle RCPs wieder eine Abflusszunahme. Von Juni bis Oktober ist mit einer Abflussabnahme zu rechnen (VZ_{75} für die meisten Werte, bei einigen sogar VZ_{100}). Im Dezember ist dann wieder mit einer Abflussabnahme zu rechnen. Unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft, unter RCP 4.5 für die nahe und ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden ist VZ_{75} gegeben. Die stärkste Abflussabnahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Juli (-36 %; VZ_{100}), im August (-40 %; VZ_{100}) und im September (-38 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im August bedeutet dies eine Reduktion des mittleren Abflusses von 96 m³/s (Tabelle 5.3) auf 58 m³/s (Tabelle 5.4). Die zukünftigen mittleren absoluten Abflüsse im September (56 m³/s) und Oktober (57 m³/s) sind ähnlich tief. Die stärkste Abflusszunahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Januar (+31 %; VZ_{100}) und Februar (+31 %; VZ_{100}) zu erwarten. Der mittlere Abfluss im Februar steigt von 67 m³/s (Tabelle 5.3) auf 88 m³/s (Tabelle 5.4) und ist somit höher als der Sommerabfluss. Das Abflussminima der mittleren Abflüsse verschiebt sich also vom Winter in den Sommer/Herbst. Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist mit einer leichten Abflussabnahme zu rechnen. VZ_{75} ist unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft, unter RCP 4.5 für die nahe und mittlere und unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft gegeben.

Der Medianabfluss (q50; Abbildung 5.10b) zeigt dieselben Trends wie die Monatsmittelwerte. Unter RCP 8.5 bis Ende Jahrhundert ist damit zu rechnen, dass der Medianabfluss im Sommer ungefähr dem heutigen q10 entspricht und dass die Abflussspitze tiefer und früher im Jahr auftritt. Bis Ende Jahrhundert fällt der minimale Medianabfluss unter allen RCPs vom Winter in den Spätsommer/Herbst (wie bei den Monatsmittelwerten).

Die tiefen Abflüsse (q10; Abbildung 5.10b) werden im Januar und Februar eher etwas höher ausfallen. Ab Mai bis Oktober ist aber vor allem für die mittlere und ferne Zukunft mit einer grösseren Abflussabnahme zu rechnen (unter RCP 2.6 am schwächsten, unter RCP 8.5 am stärksten).

Die hohen Abflüsse (q90; Abbildung 5.10b) werden im Winter generell unter allen RCPs höher ausfallen. Im Sommer/Herbst werden die Abflüsse eher tiefer ausfallen. Unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft ist q90 nur noch knapp über dem heutigen Medianabfluss.

5.4.8 Sihl

Bei der Sihl sind die generellen Trends der Veränderungen der mittleren Abflüsse ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Einzugsgebieten (Abbildung 5.11a). Im Detail unterscheiden sich diese aber. Im Januar ist mit einer grösseren Abflusszunahme zu rechnen. Unter allen RCPs und Zeitperioden ist VZ_{75} gegeben (Tabelle 5.2). Im Februar ist ebenfalls eine Abflusszunahme zu erwarten. VZ_{75} ist unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft, unter RCP 4.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden gegeben. Von März bis Mai ist mit einer Abflussabnahme zu rechnen. Im März ist VZ_{75} nur unter RCP 2.6 für alle Zeitperioden und unter RCP 4.5 für die mittlere Zukunft gegeben, im April und Mai bei fast allen Werten (bei vier Werten sogar VZ_{100}). Im Juni ist keine klare Tendenz einer Veränderung zu erwarten. Von Juli bis September sind tiefere Abflüsse zu erwarten. Bei den meisten Werten im Juli und August, sowie bei allen Werten im September ist VZ_{75} gegeben, bei vier Werten davon VZ_{100} . Im Oktober sind die Trends unter RCP 2.6 und 4.5 nicht eindeutig. Unter RCP 8.5 ist allerdings mit einem Abflussrückgang für alle Zeitperioden zu rechnen (VZ_{75}). Im Dezember ist wieder eine Abflusszunahme zu erwarten. Die stärkste Abflussabnahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im August (-28 %; VZ_{100}) und September (-30 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im September entspricht dies einer Reduktion des mittleren Abflusses von 6.6 m³/s (Tabelle 5.3) auf 4.6 m³/s (Tabelle 5.4). Die stärkste Abflusszunahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Januar (+31 %; VZ_{75}) zu erwarten. Dies entspricht einer Zunahme des mittleren Abflusses von 5.4 m³/s (Tabelle 5.3) auf 7.1 m³/s (Tabelle 5.4). Wie bei der Limmat verschiebt sich das Abflussminima der mittleren Abflüsse vom Winter in den Sommer. Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist bei der Sihl mit einer leichten Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.11a, Tabelle 5.2). Unter allen RCPs und Zeitperioden, ausser unter RCP 8.5 für die nahe Zukunft, ist VZ_{75} dafür gegeben.

Der Medianabfluss (q50; Abbildung 5.11b) verändert sich sehr ähnlich wie der mittlere Abfluss. Unter allen RCPs ist aber vor allem ein Abflussrückgang im Frühling zu erwarten. Da der Sihlsee stark reguliert wird, sind die Medianabflüsse ausserdem sehr nahe bei den tiefen Abflüssen (q10).

Bei den tiefen Abflüssen (q10; Abbildung 5.11b) sind keine grossen Veränderungen zu erwarten.

Die hohen Abflüsse (q90; Abbildung 5.11b) gleichen sich unter allen RCPs bis Ende Jahrhundert von Dezember bis Mai an (werden ähnlich hoch), wodurch der Frühlingspeak wegfällt. Im Sommer gehen die hohen Abflüsse ebenfalls zurück, unter RCP 8.5 bis Ende Jahrhundert sogar sehr stark.

5.4.9 Thur

Die Thur zeigt dieselben groben Trends der Veränderungen der mittleren Abflüsse wie alle bisher beschriebenen Einzugsgebiete: eine Abflusszunahme im Winter und eine Abflussreduktion im Sommer (Abbildung 5.12a). Im Januar ist unter allen RCPs und Zeitperioden mit einer Abflusszunahme zu rechnen. VZ_{75} ist für alle Werte gegeben (Tabelle 5.2). Im Februar ist eher mit einer Abflusszunahme zu rechnen. Unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden ist dieser Trend am deutlichsten mit VZ_{75} . Im März ist, wie bei den meisten anderen Gebieten auch, unter RCP 2.6 für alle Zeitperioden eine Abflussreduktion zu erwarten (VZ_{75}). Im April ist eher mit einer Abflussabnahme zu rechnen. Unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft und unter RCP 4.5 und 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft ist VZ_{75} gegeben. Von Juli bis September ist unter allen RCPs und Zeitperioden eine

Abflussabnahme zu erwarten. Für die meisten Werte ist VZ_{75} gegeben, bei einigen sogar VZ_{100} . Im Dezember ist mit einer Abflusszunahme zu rechnen. VZ_{75} ist unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft, unter RCP 4.5 für die nahe und mittlere Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden gegeben. Der stärkste Abflussrückgang ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im August (-42 %; VZ_{100}) und im September (-44 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im September bedeutet dies eine Reduktion der mittleren Abflüsse von 44 m³/s (Tabelle 5.3) auf 25 m³/s (Tabelle 5.4). Die stärkste Abflusszunahme ist im Januar (+35 %; VZ_{75}) zu erwarten. Dies bedeutet eine Zunahme der mittleren Abflüsse von 43 m³/s (Tabelle 5.3) auf 58 m³/s (Tabelle 5.4). Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist mit einer leichten Abflussabnahme zu rechnen, vor allem unter RCP 2.6, wo VZ_{75} in allen Zeitperioden gegeben ist (Abbildung 5.12a, Tabelle 5.2).

Der Medianabfluss (q_{50}) sowie die tiefen Abflüsse (q_{10} ; Abbildung 5.12b) verhalten sich sehr ähnlich wie die mittleren Abflüsse.

Bei den hohen Abflüssen (q_{90} ; Abbildung 5.12b) ist derselbe Trend zu sehen wie bei der Sihl. Von Dezember bis Mai gleicht sich der Abfluss bis Ende Jahrhundert an, sodass der Frühlingspeak wegfällt. Im Sommer ist eine Reduktion der hohen Abflüsse zu erwarten.

5.4.10 Rhein

Rhein Neuhausen

Beim Rhein in Neuhausen ist im Winter und Frühling mit einer Zunahme der mittleren Abflüsse zu rechnen sowie mit einer Abnahme im Sommer (Abbildung 5.13a). Von Januar bis März ist unter allen drei RCPs und Zeitperioden mit einer Abflusszunahme zu rechnen. VZ_{75} ist für alle Werte gegeben (Tabelle 5.2). Im April und Mai ist eher mit einer Abflusszunahme zu rechnen. Der Trend ist jedoch weniger deutlich. Im April ist VZ_{75} unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft, unter RCP 4.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden gegeben, unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft sogar VZ_{100} . Im Mai ist VZ_{75} unter RCP 2.6 für die mittlere und ferne Zukunft, unter RCP 4.5 für die nahe und ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für die nahe und mittlere Zukunft gegeben, unter RCP 8.5 für die mittlere Zukunft VZ_{100} . Von Juli bis Oktober ist unter allen RCPs und Zeitperioden mit einer Abflussabnahme zu rechnen. Für fast alle Werte ist VZ_{75} gegeben. Im August und September ist sogar VZ_{100} für die meisten Werte gegeben. Die stärkste Reduktion der Abflüsse ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im August (-38 %; VZ_{100}) und September (-39 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im September bedeutet dies eine Reduktion der mittleren Abflüsse von 397 m³/s (Tabelle 5.3) auf 242 m³/s (Tabelle 5.4). Die stärkste Abflusszunahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Februar (+24 %; VZ_{75}) und März (+23 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im Februar bedeutet dies eine Zunahme der mittleren Abflüsse von 246 m³/s (Tabelle 5.3) auf 305 m³/s (Abbildung 5.13a, Tabelle 5.4). Wie bei der Limmat und der Sihl verschiebt sich das Abflussminima der mittleren Abflüsse vom Winter in den Sommer. Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist kein eindeutiger Trend ersichtlich.

Der Medianabfluss (q_{50} ; Abbildung 5.13b) verändert sich sehr ähnlich wie die mittleren Abflüsse. Bis Ende Jahrhundert ist jedoch damit zu rechnen, dass der Medianabfluss im Sommer auf die Grössenordnung von q_{10} der Referenzperiode sinkt. Zudem ist unter allen RCPs bis Ende Jahrhundert eine Verschiebung des minimalen jährlichen Medianabflusses vom Winter in den Spätsommer/Herbst zu erwarten (wie bei den Monatsmittelwerten).

Im Januar ist bei den tiefen Abflüssen (q_{10} ; Abbildung 5.13b) unter RCP 2.6 und RCP 4.5 eher mit einer Abnahme zu rechnen, unter RCP 8.5 mit keiner grossen Veränderung. Ausserdem beginnt die Abflussreduktion im Sommer bei den tiefen Abflüssen unter allen RCPs früher im Jahr und dauert auch länger (Ende Jahrhundert bis im Dezember).

Bei den hohen Abflüssen (q_{90} ; Abbildung 5.13b) ist ein ähnlicher Trend zu erwarten wie bei den mittleren Abflüssen. Unter RCP 8.5 ist bis Ende Jahrhundert im Sommer damit zu rechnen, dass

die Abflüsse auf die Grössenordnung der Medianabflüsse der Referenzperiode sinken. Weiter ist damit zu rechnen, dass die hohen Abflüsse unter allen RCPs und Zeitperioden bereits ab Dezember zunehmen.

Rhein Rekingen

Beim Rhein in Rekingen sind die Trends der Veränderungen der mittleren Abflüsse ähnlich (Abbildung 5.14a). Im Januar und Februar ist mit einer Abflusszunahme zu rechnen (VZ_{75} für alle Werte; Tabelle 5.2). Im März ist unter RCP 2.6 eher mit einer Abflussabnahme (oder keiner Veränderung) zu rechnen, unter RCP 4.5 und 8.5 eher mit einer Abflusszunahme. VZ_{75} ist gegeben unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft, unter RCP 4.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden. Im April ist unter RCP 8.5 mit einer Abflusszunahme für alle Zeitperioden zu rechnen (VZ_{75}). Von Juli bis Oktober ist mit einer Abflussabnahme zu rechnen. Bei fast allen Werten ist VZ_{75} gegeben, bei den meisten Werten von Juli bis September VZ_{100} . Die stärkste Abflussreduktion ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im August (-38 %; VZ_{100}) und September (-40 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im September bedeutet dies eine Reduktion des mittleren Abflusses von 468 m³/s (Tabelle 5.3) auf 281 m³/s (Tabelle 5.4). Die stärkste Abflusszunahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Februar (+22 %; VZ_{75}) zu erwarten. Dies bedeutet eine Zunahme der mittleren Abflüsse von 318 m³/s (Tabelle 5.3) auf 388 m³/s (Tabelle 5.4). Das Abflussminima der mittleren Abflüsse verschiebt sich vom Winter in den Spätsommer/Herbst. Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist kein eindeutiger Trend ersichtlich (Abbildung 5.14a, Tabelle 5.2). Allenfalls ist mit einer leichten Abflussabnahme zu rechnen.

Wie auch beim Rhein in Neuhausen verhält sich der Medianabfluss (q_{50}) beim Rhein in Rekingen (Abbildung 5.14b) sehr ähnlich wie die mittleren Abflüsse. Unter RCP 8.5 ist bis Ende Jahrhundert im Sommer ebenfalls mit einer Abflussabnahme auf die Grössenordnung von q_{10} der Referenzperiode zu rechnen. Der minimale Medianabfluss verschiebt sich bis Ende Jahrhundert auch vom Winter in den Spätsommer/Herbst. Unter RCP 4.5 und 8.5, ist dies ebenfalls in den berechneten zukünftigen Medianen der Monatsmittelwerte zu sehen (Tabelle 5.4).

Die tiefen Abflüsse (q_{10} ; Abbildung 5.14b) verhalten sich gleich wie beim Rhein in Neuhausen. Anfang Januar bleiben sie eher gleich oder nehmen sogar ab. Die tieferen Abflüsse im Sommer beginnen auch bereits früher im Jahr und bleiben länger tief (bis im Dezember).

Bei den hohen Abflüssen (q_{90} ; Abbildung 5.14b) ist ein ähnlicher Trend wie bei den Medianabflüssen zu erwarten. Unter RCP 8.5 bis Ende Jahrhundert ist damit zu rechnen, dass die hohen Abflüsse sich an den Medianabfluss der Referenzperiode annähern. Die höheren Abflüsse im Winter beginnen bereits ab Dezember grösser zu werden.

5.4.11 Reuss

Die Reuss in Mellingen folgt dem generellen Trend: eine Zunahme der mittleren Abflüsse im Winter und eine Abnahme im Sommer (Abbildung 5.15a). Von Dezember bis Februar ist unter allen RCPs und Zeitperioden mit einer Abflusszunahme zu rechnen. VZ_{75} ist für alle Werte gegeben, ausser im Dezember unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft (Tabelle 5.2). Im März ist unter RCP 2.6 kaum mit einer Veränderung zu rechnen (allenfalls mit einer leichten Abnahme), unter RCP 4.5 und 8.5 eher mit einer Abflusszunahme. Unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft, unter RCP 4.5 für die nahe und ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft ist VZ_{75} gegeben. Von Juli bis Oktober ist mit einer Abflussabnahme zu rechnen. Von Juli bis September ist bei allen Werten VZ_{75} gegeben, bei den meisten sogar VZ_{100} . Im Oktober ist VZ_{75} nur unter RCP 2.6 für die mittlere und ferne Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden gegeben. Die stärkste Abflussabnahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Juli (-45 %; VZ_{100}), im August (-51 %; VZ_{100}) und September (-45 %; VZ_{100}) zu erwarten. Im August bedeutet dies eine Reduktion der mittleren Abflüsse von

187 m³/s (Tabelle 5.3) auf 92 m³/s (Tabelle 5.4). Die stärkste Abflusszunahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im Januar (+55 %; VZ₁₀₀) und Februar (+46 %; VZ₁₀₀) zu erwarten. Im Januar bedeutet dies eine Zunahme der mittleren Abflüsse von 75 m³/s (Tabelle 5.3) auf 116 m³/s (Tabelle 5.4). Das Abflussminima der mittleren Abflüsse verschiebt sich vom Winter in den Spätsommer/Herbst. Bei den mittleren jährlichen Abflüssen ist mit einer leichten Abflussabnahme zu rechnen. Unter RCP 2.6 und 4.5 für allen Zeitperioden sowie unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft ist VZ₇₅ dafür gegeben.

Die Medianabflüsse (q₅₀) und tiefen Abflüsse (q₁₀; Abbildung 5.15b) zeigen denselben Trend wie die mittleren Abflüsse. Bei der Abflussabnahme im Sommer ist damit zu rechnen, dass der Medianabfluss unter RCP 4.5 Ende Jahrhundert und unter RCP 8.5 für die mittlere Zukunft ähnlich hoch sind wie q₁₀ der Referenzperiode. Unter RCP 8.5 ist bis Ende Jahrhundert im Sommer sogar mit Medianabflüssen zu rechnen, die tiefer sind als q₁₀ der Referenzperiode. Bis Ende Jahrhundert verschiebt sich das Minimum des jährlichen Medianabflusses unter RCP 8.5 vom Winter in den Spätsommer/Herbst, unter RCP 2.6 und 4.5 gibt es zwei ähnlich tiefe Bereiche im Winter und Spätsommer/Herbst.

Die tiefen Abflüsse nehmen im Sommer unter RCP 4.5 und 8.5 bereits früher ab, unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft bereits ab Mai.

Die hohen Abflüsse (q₉₀; Abbildung 5.15b) verhalten sich sehr ähnlich wie die Medianabflüsse. Unter RCP 8.5 ist im Sommer bis Ende Jahrhundert mit einer Abnahme bis nahe zu den Medianabflüssen der Referenzperiode zu rechnen.

Reppisch - Dietikon

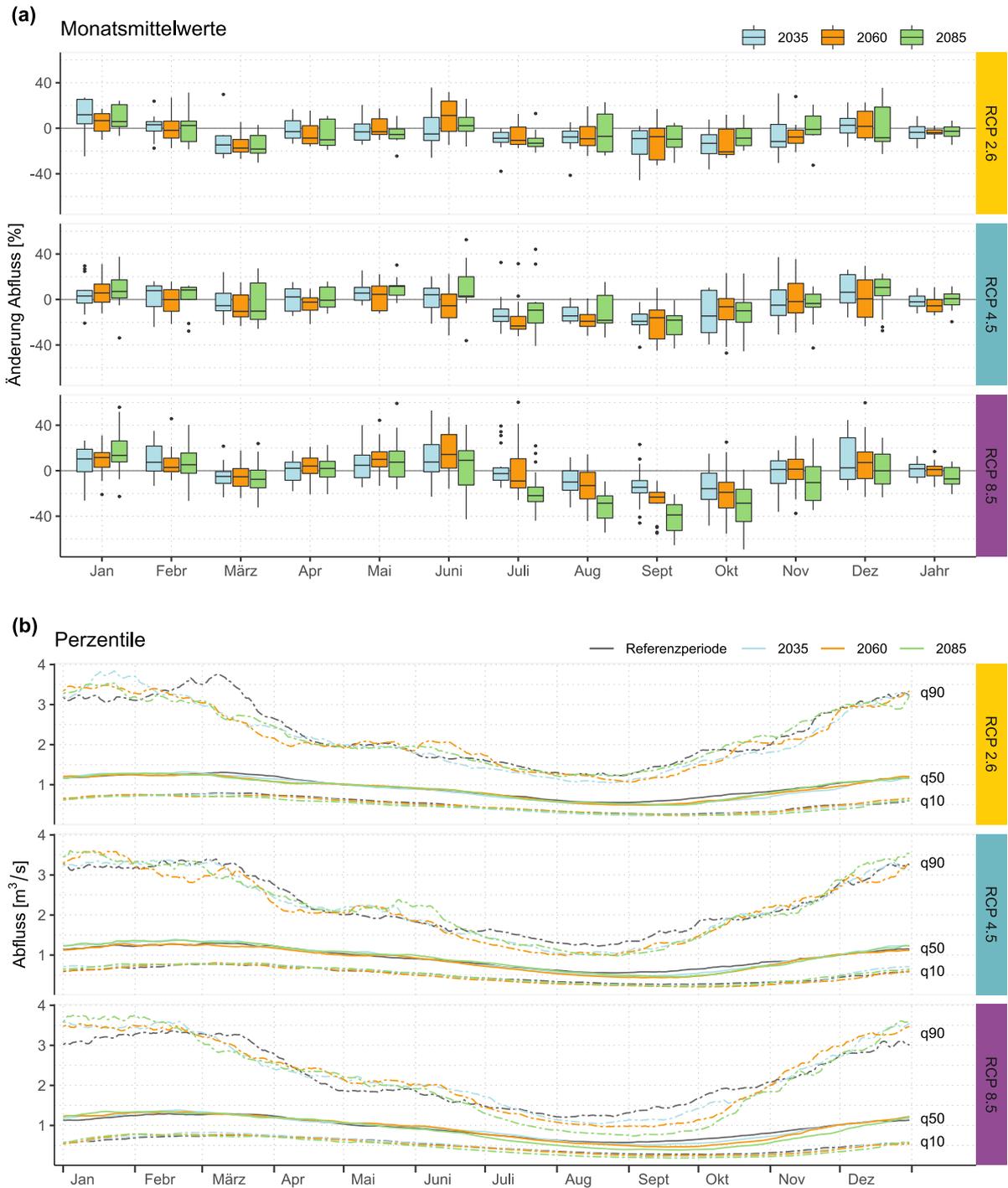


Abbildung 5.3 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Reppisch bei Dietikon. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m^3/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Greifensee

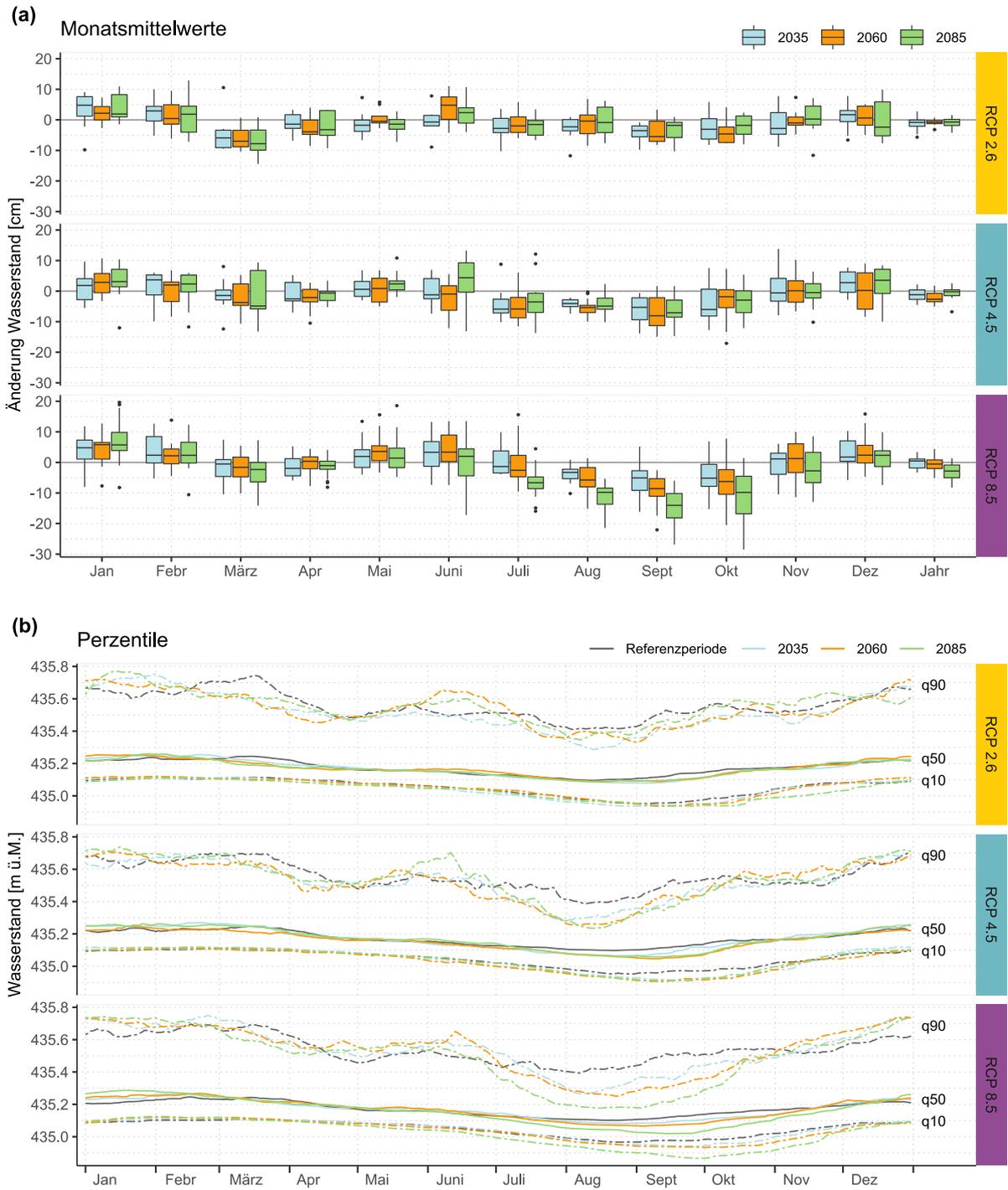


Abbildung 5.4 Wasserstandszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für den Greifensee. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (cm) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (m ü.M.), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Glatt - Dübendorf

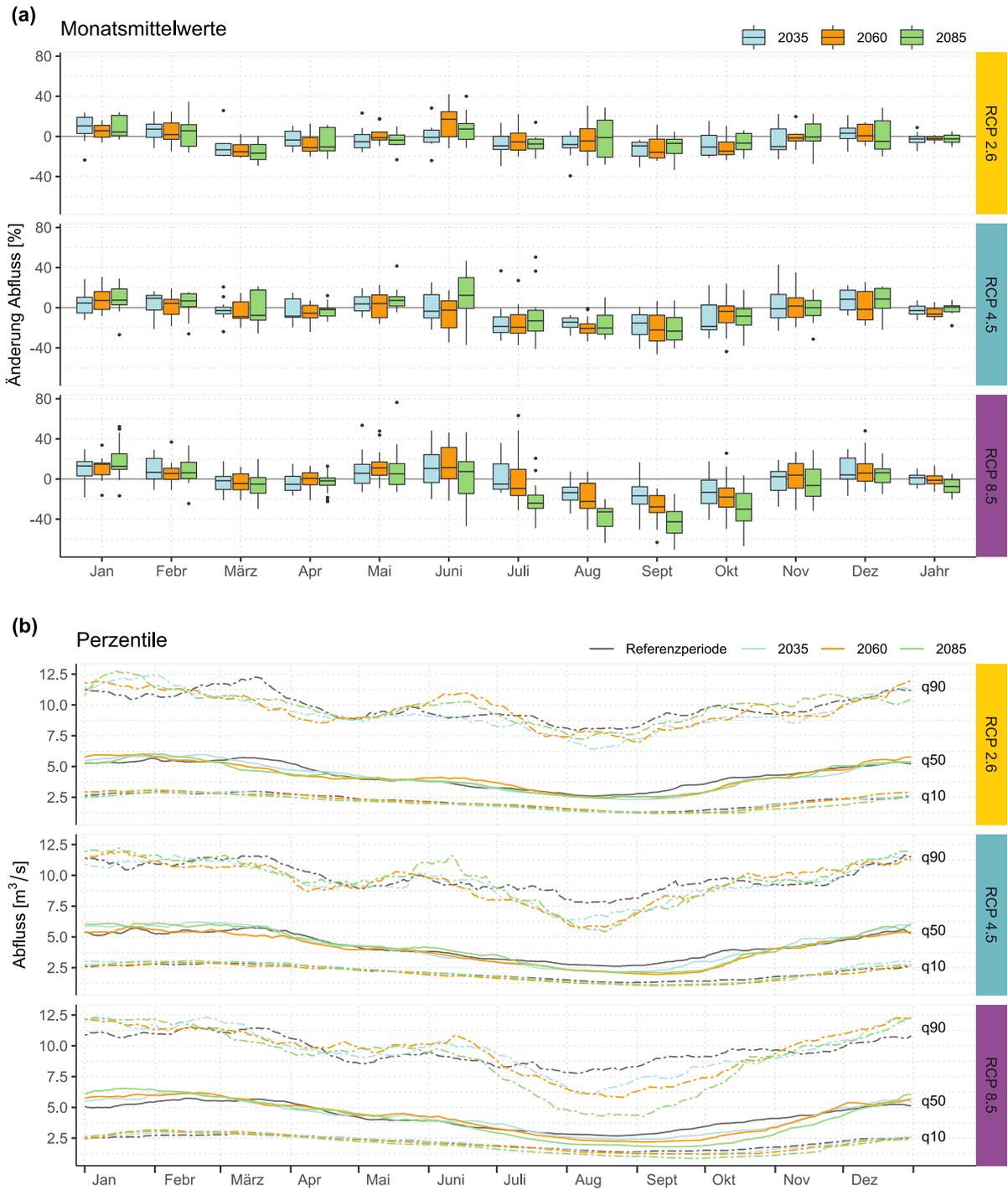


Abbildung 5.5 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Glatt bei Dübendorf. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m^3/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Glatt - Rheinsfelden

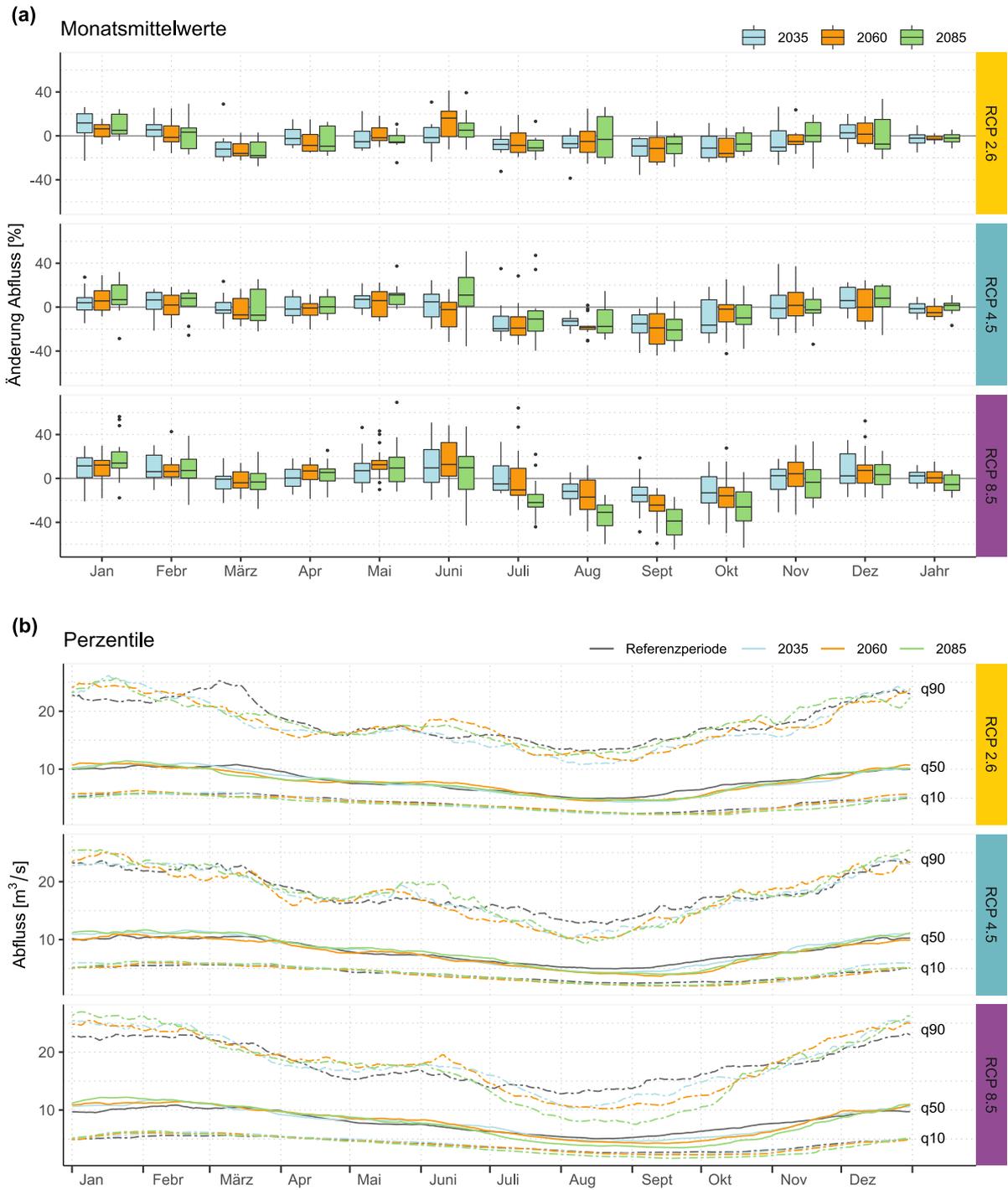


Abbildung 5.6 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Glatt bei Rheinsfelden. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m^3/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Töss - Freienstein

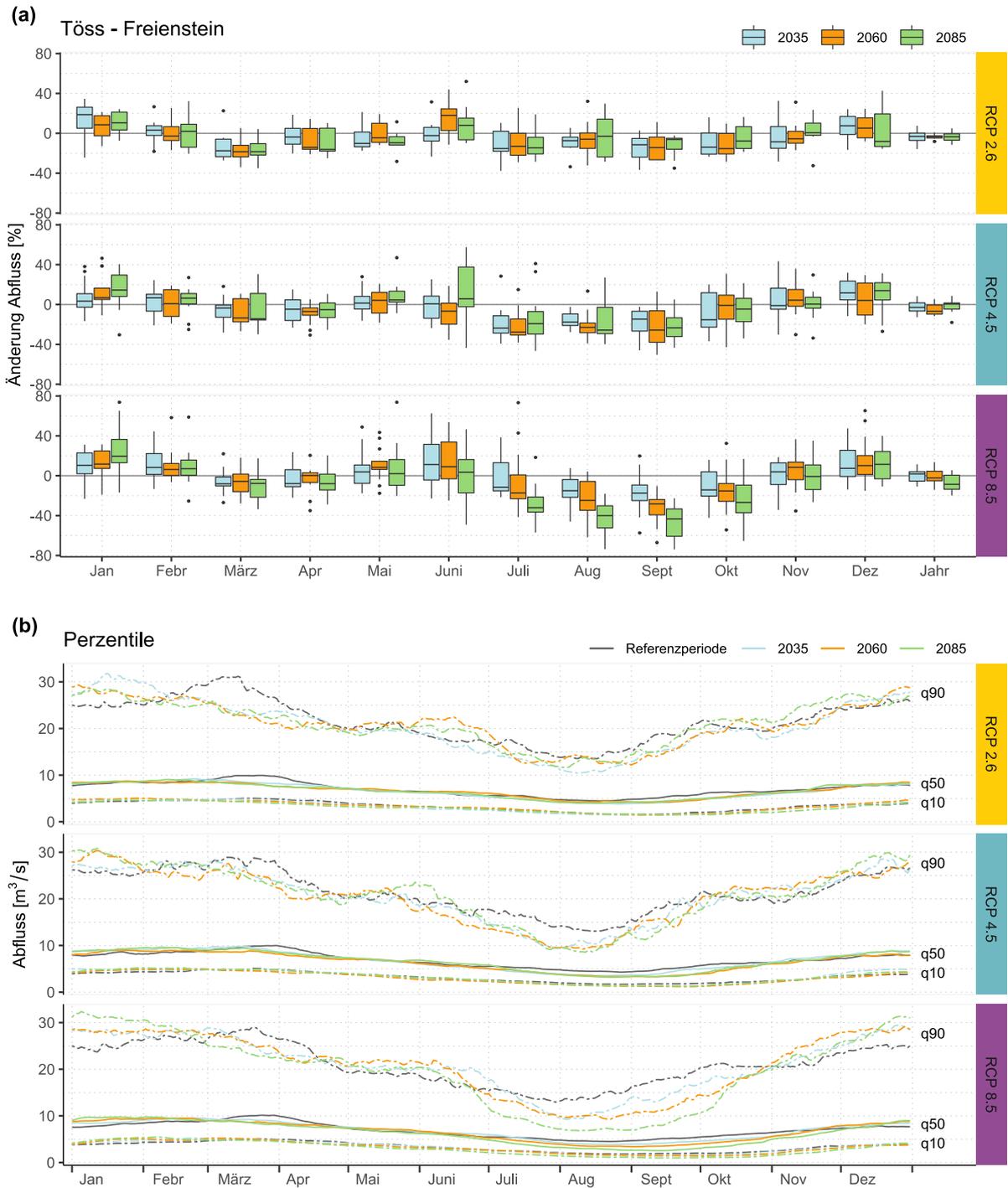


Abbildung 5.7 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Töss bei Freienstein. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m³/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Furtbach - Würenlos

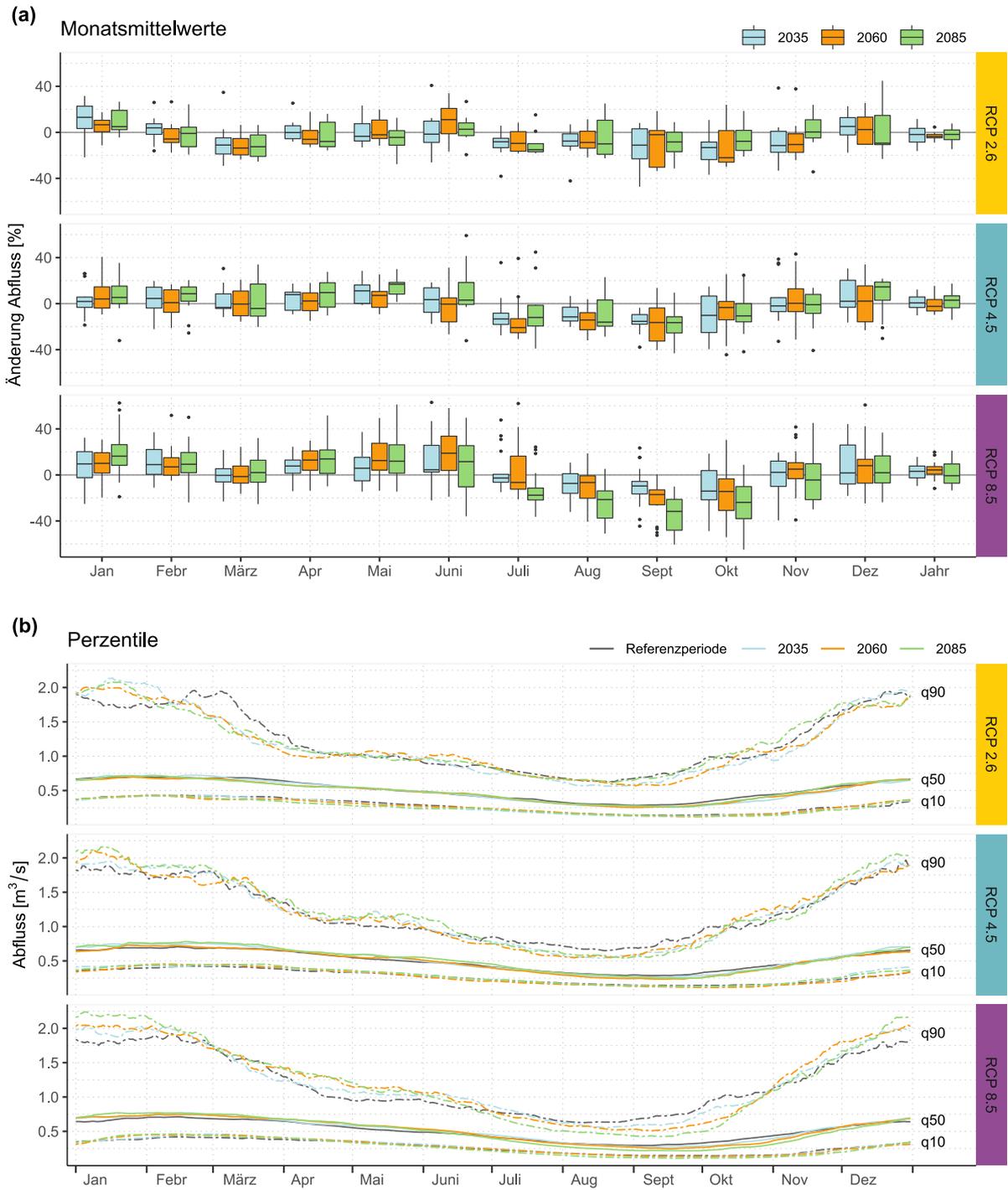


Abbildung 5.8 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für den Furtbach bei Würenlos. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m³/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Zürichsee

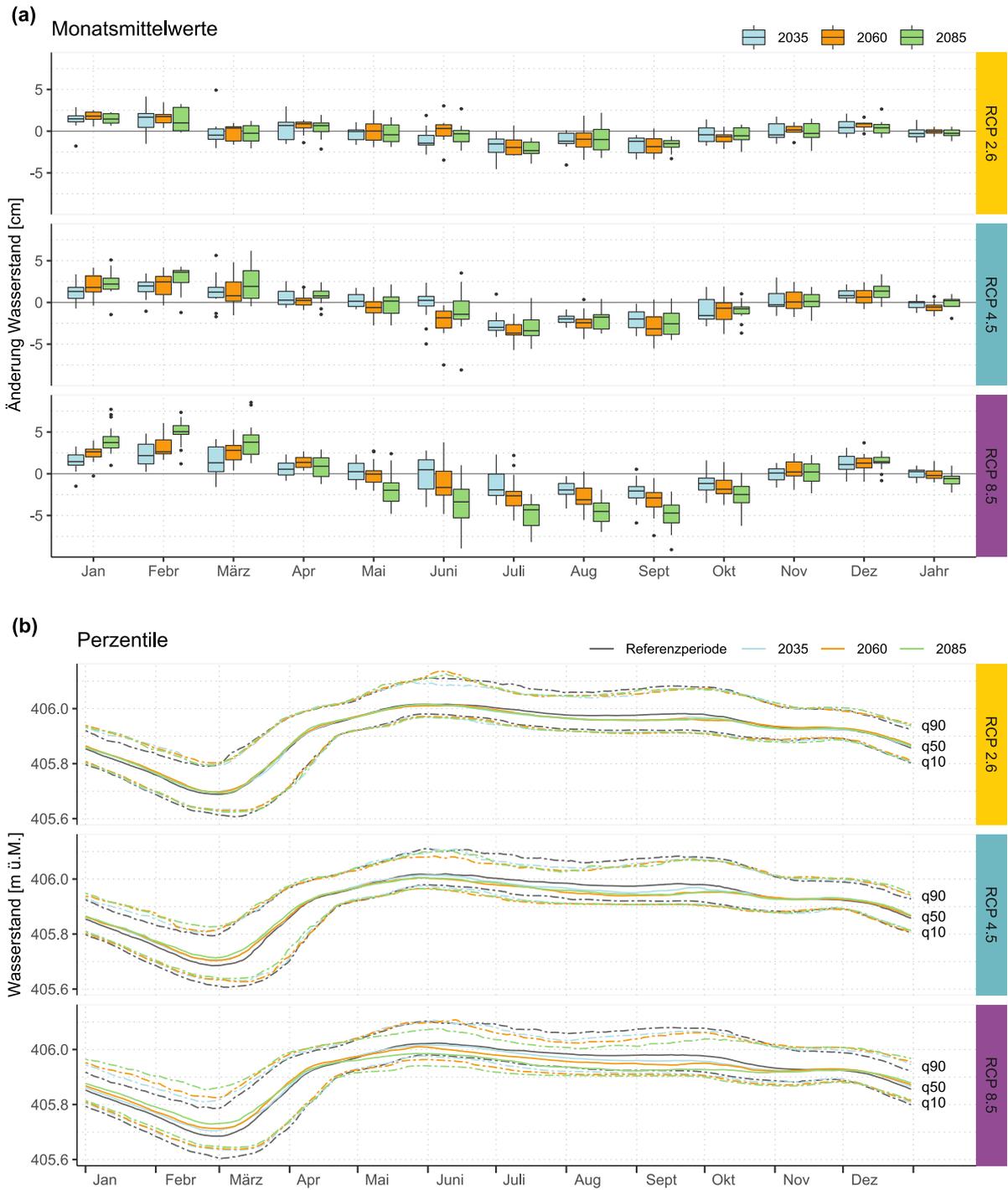


Abbildung 5.9 Wasserstandszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für den Zürichsee. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (cm) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (m ü. M.), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Limmat - Zürich

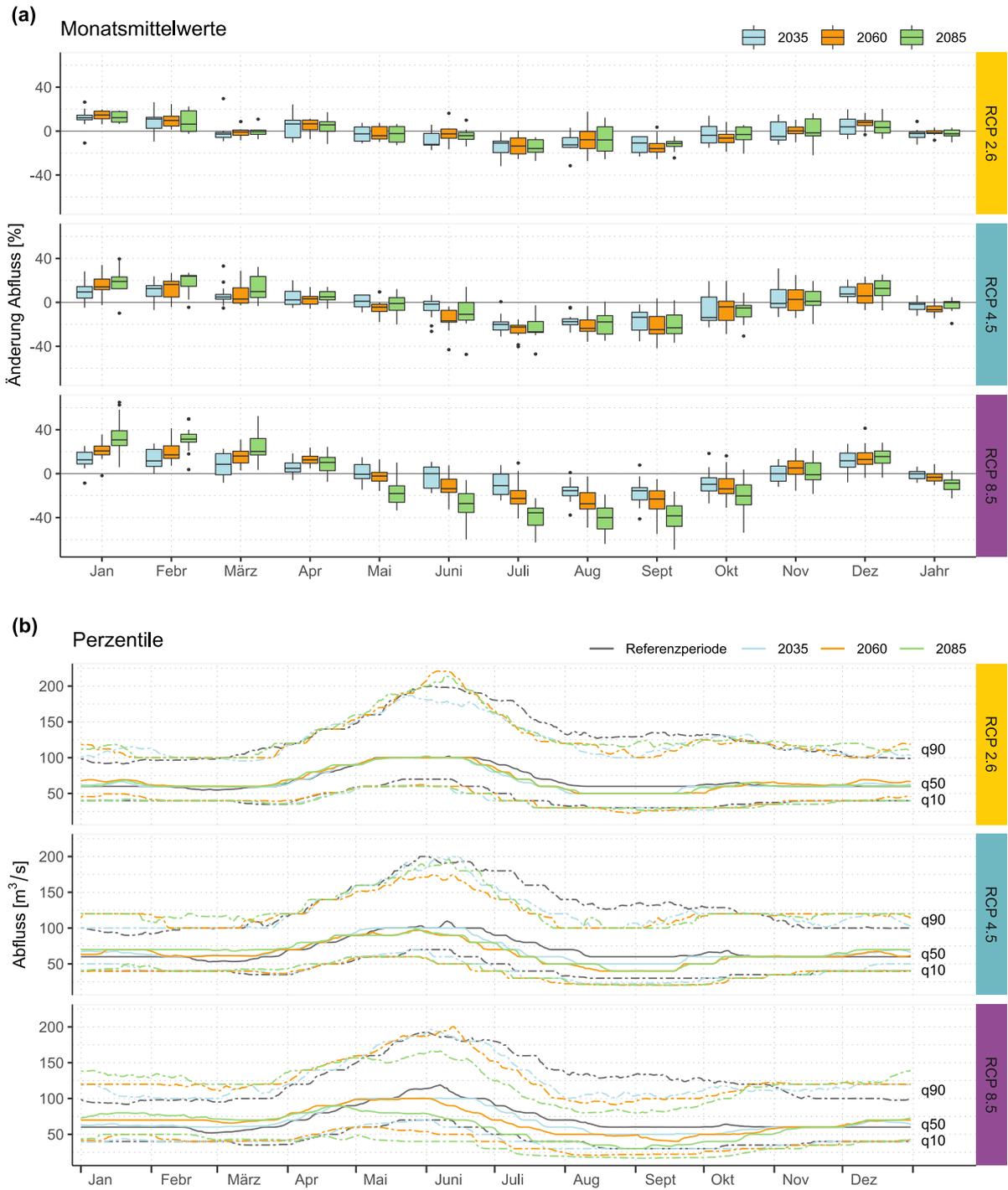


Abbildung 5.10 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Limmat bei Zürich. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m³/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Sihl - Zürich

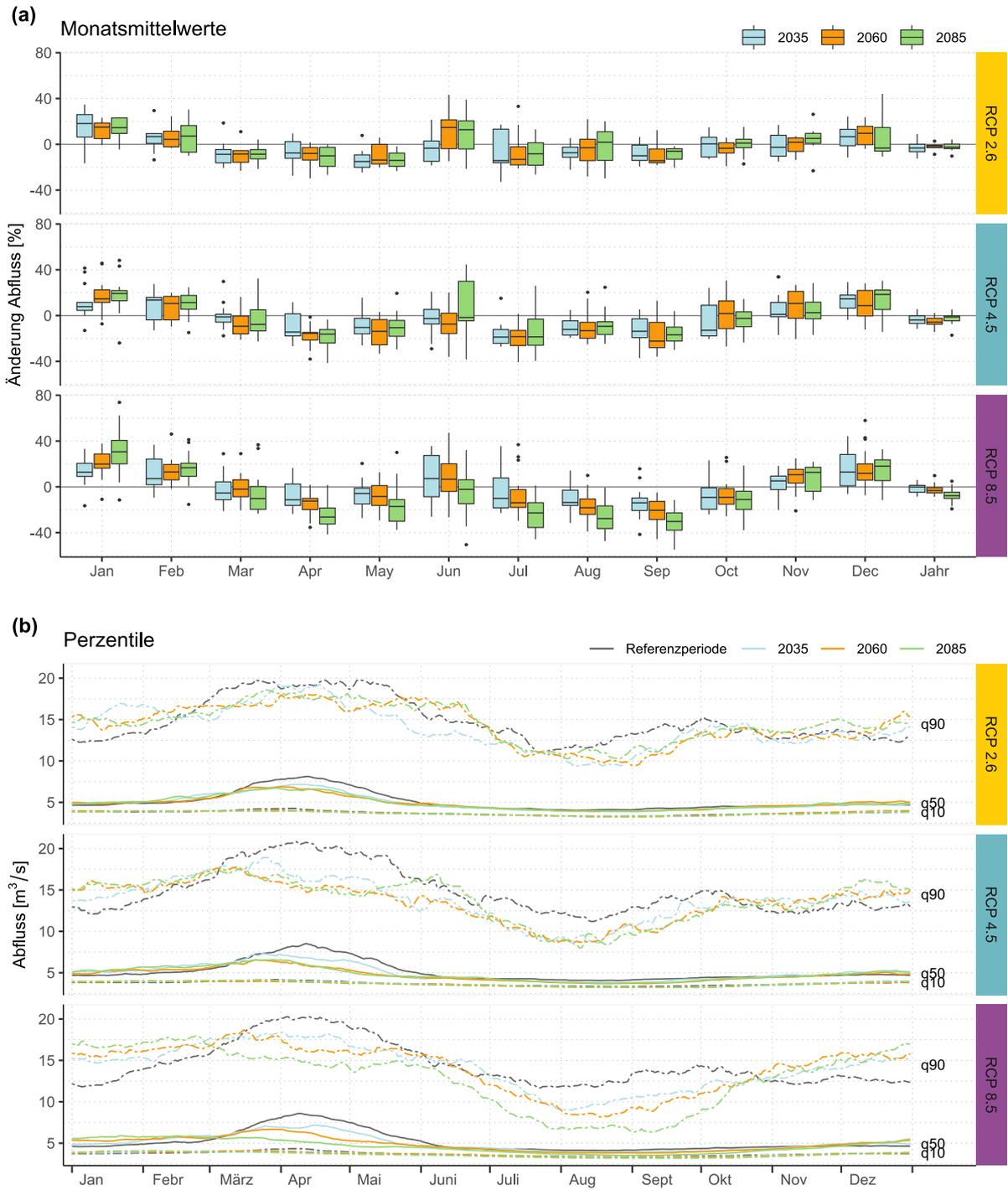


Abbildung 5.11 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Sihl bei Zürich. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m³/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Thur - Andelfingen

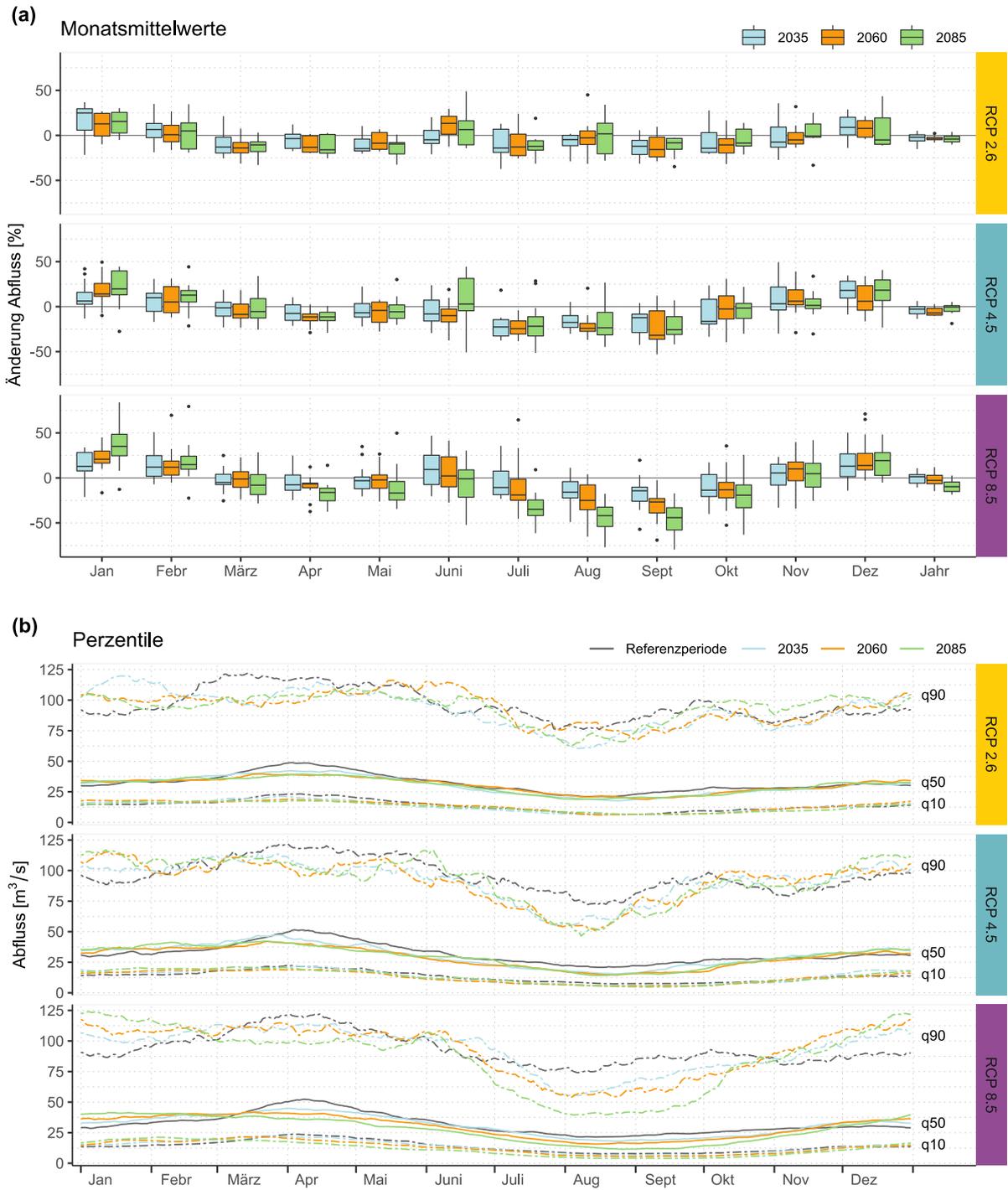


Abbildung 5.12 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Thur bei Andelfingen. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m³/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Rhein - Neuhausen

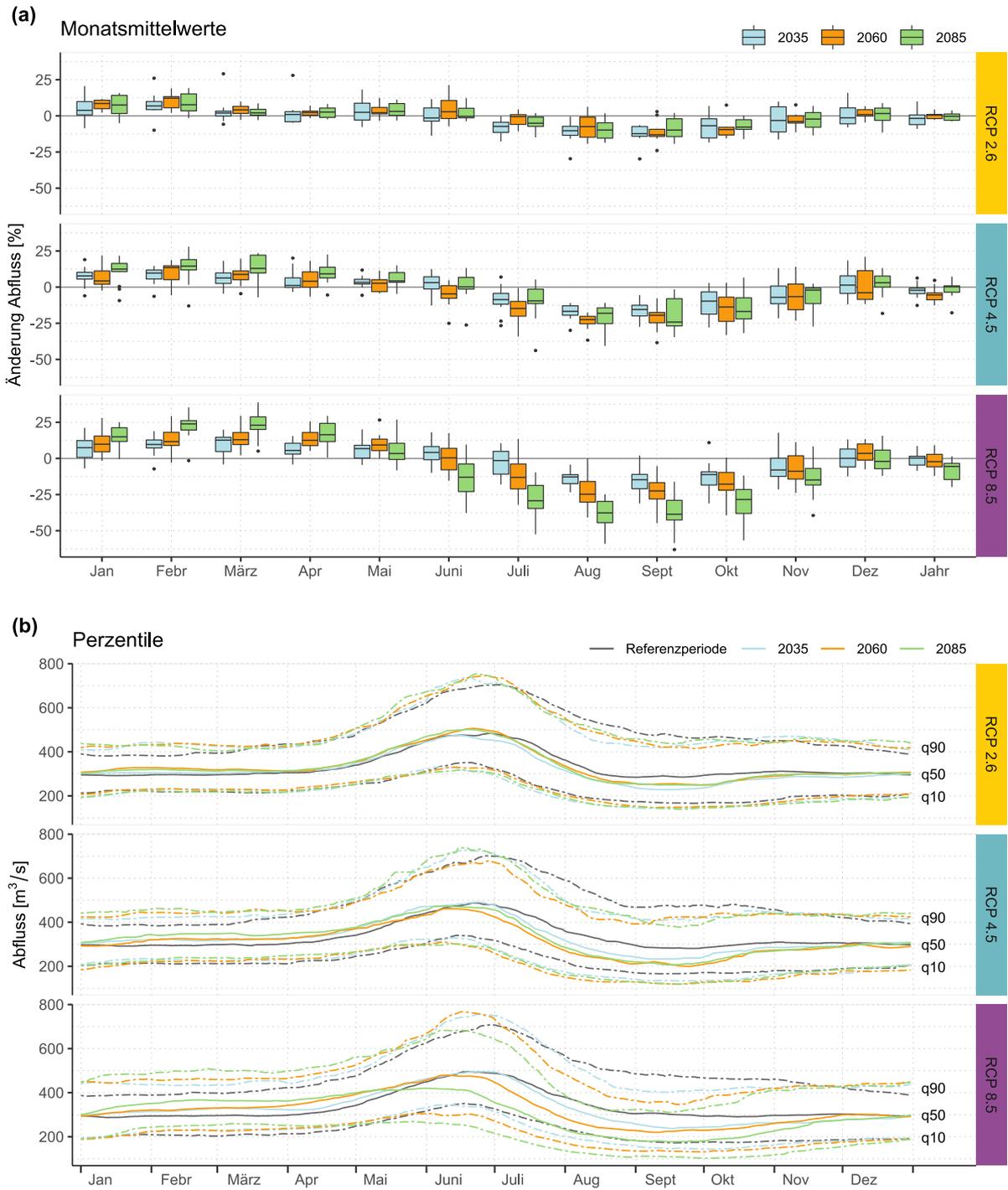


Abbildung 5.13 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für den Rhein bei Neuhausen. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m^3/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Rhein - Rekingen

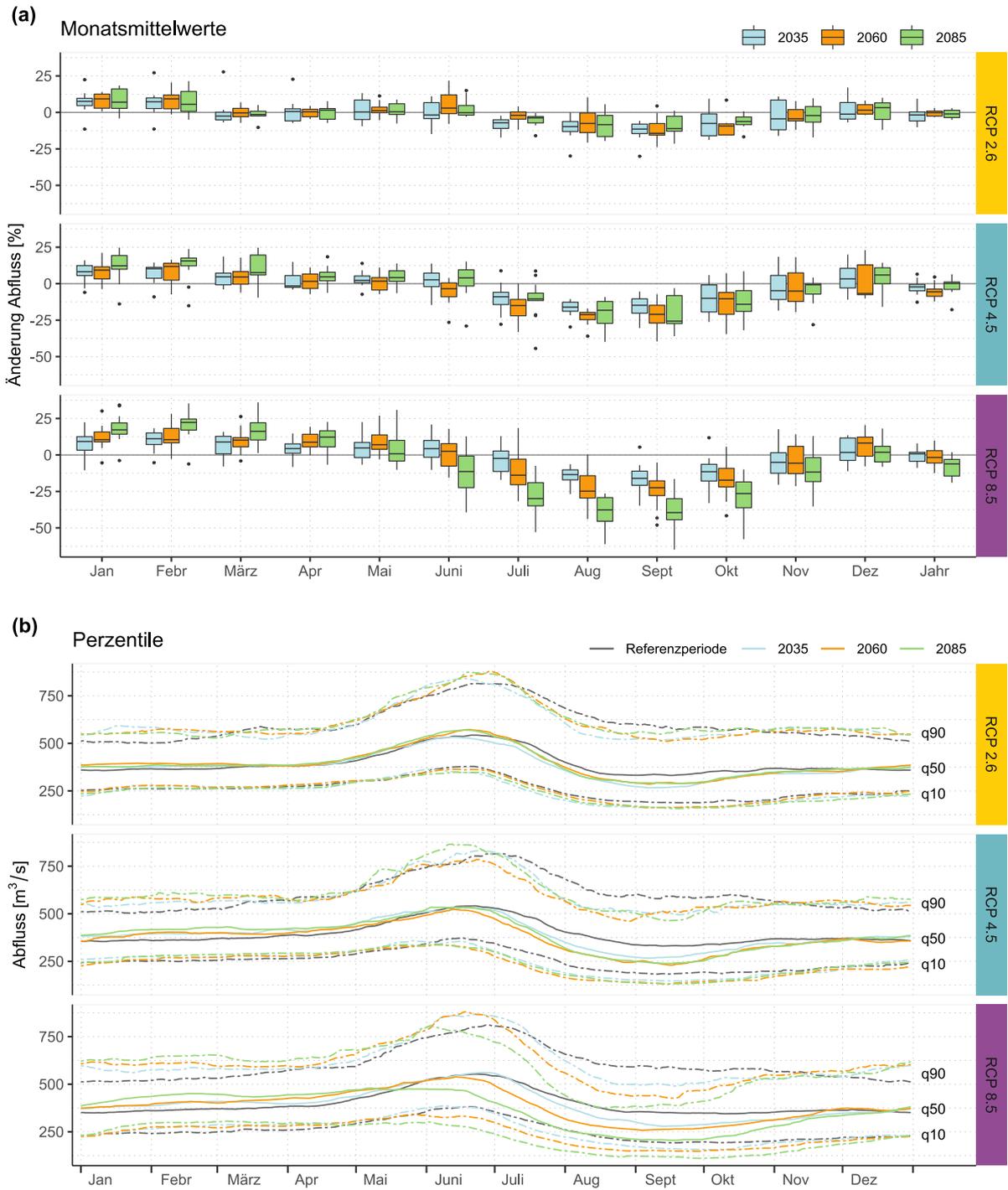


Abbildung 5.14 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für den Rhein bei Rekingen. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m^3/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Reuss - Mellingen

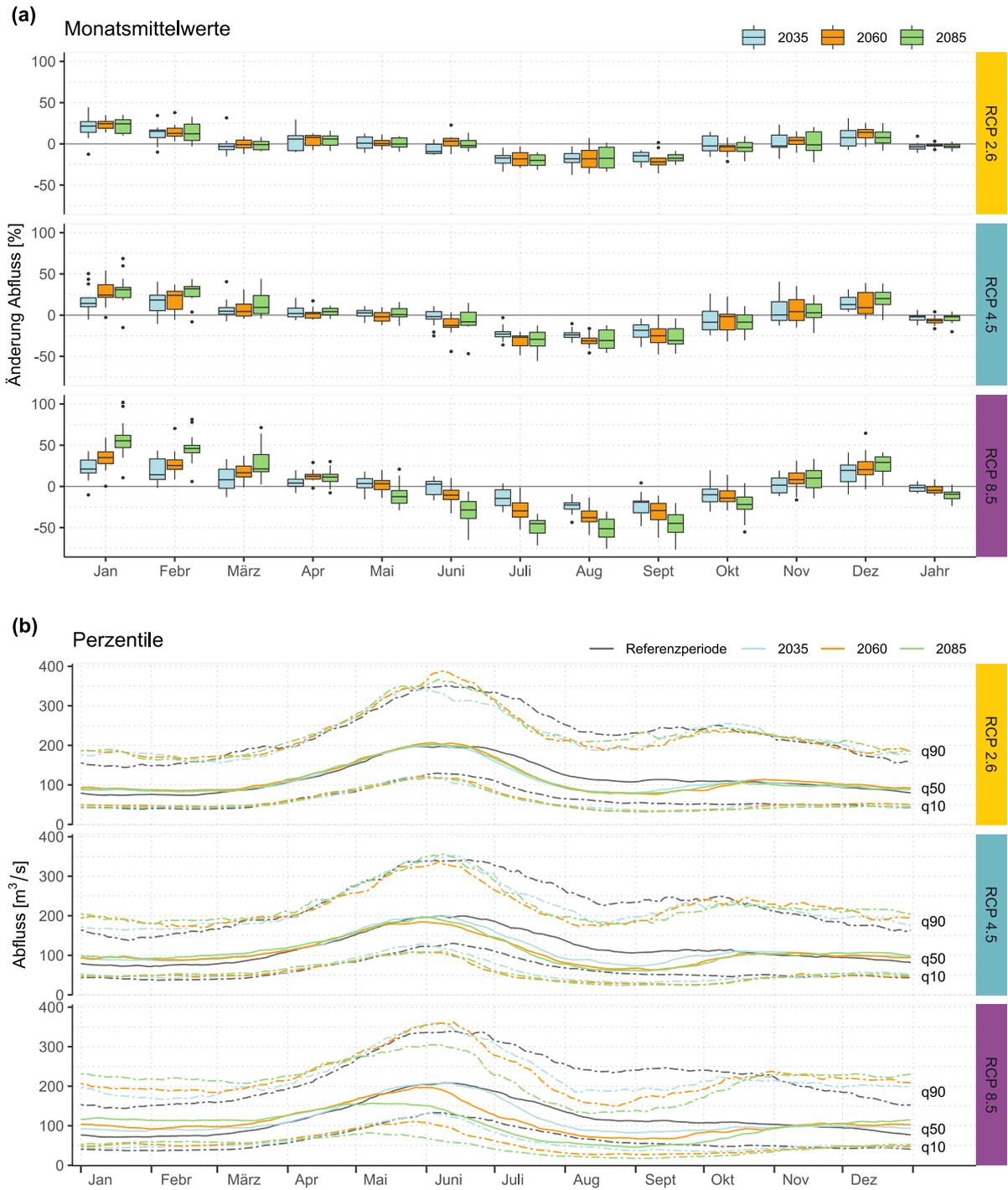


Abbildung 5.15 Abflusszenarien (Simulationen mit CH2018 Daten) für die Reuss bei Mellingen. Dargestellt sind (a) die relativen Veränderungen (%) der Monatsmittelwerte und des Jahresmittelwerts der 39 Modellketten, in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP. Zusätzlich sind (b) die Mediane der 39 Modellketten der 10 %, 50 % und 90 % Perzentile (q10, q50, q90) dargestellt (in m³/s), ebenfalls separiert nach Zeitperiode und RCP.

Tabelle 5.2 Mediane der relativen Monats- und Jahresmittelwerte der 39 Abflusszenarien/Wasserstandszenarien in Bezug zur Referenzperiode (in % für Abflüsse, in cm für Wasserstände) für die Reppisch (Dietikon), den Greifensee, die Glatt (Dübendorf, Rheinsfelden), die Töss (Freienstein), den Furtbach (Würenlos), den Zürichsee, die Limmat (Zürich), die Sihl (Zürich), die Thur (Andelfingen), den Rhein (Neuhausen, Rekingen) und die Reuss (Mühlau), separiert nach RCP und Zeitperiode. Die mit einem * gekennzeichneten Werte zeigen eine Übereinstimmung der Vorzeichen der Modellketten von mindestens 75 %. Bei den mit ** gekennzeichneten Werten ist das Vorzeichen für alle Modellketten (100 %) gleich. Alle hier dargestellten Werte sollten mit äusserster Vorsicht verwendet werden, da die komplette Klimaunsicherheit der verschiedenen Modellketten nicht berücksichtigt wurde!

Fliessgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan [%] [cm]	Febr [%] [cm]	März [%] [cm]	Apr [%] [cm]	Mai [%] [cm]	Juni [%] [cm]	Juli [%] [cm]	Aug [%] [cm]	Sept [%] [cm]	Okt [%] [cm]	Nov [%] [cm]	Dez [%] [cm]	Jahr [%] [cm]
Reppisch, Dietikon	2.6	2035	12*	3*	-15*	-3	-3*	-5	-9**	-8*	-9*	-13*	-12	3	-4*
Reppisch, Dietikon	2.6	2060	7	-2	-17*	-9	-3	11*	-11*	-9*	-7*	-21*	-8*	2	-4*
Reppisch, Dietikon	2.6	2085	6*	2	-18*	-10	-5*	2	-13*	-7	-10	-9*	-1	-8	-3
Reppisch, Dietikon	4.5	2035	3	8	-5	2	6	4	-15*	-14*	-19**	-15	-5	6	-2
Reppisch, Dietikon	4.5	2060	6	0	-10	-2	5	-5	-23*	-19*	-16*	-6	-2	1	-6*
Reppisch, Dietikon	4.5	2085	7*	8*	-10	-1	12*	3*	-9*	-18	-18**	-10*	-4	11*	1
Reppisch, Dietikon	8.5	2035	10	7	-5*	2	5	8	-3	-10	-15*	-16	1	3	2
Reppisch, Dietikon	8.5	2060	12*	3	-5	4	10*	14*	-9	-13*	-23**	-19*	1	7	1
Reppisch, Dietikon	8.5	2085	13*	5	-8	2	8	9	-22*	-29**	-39**	-29*	-10	0	-7
Greifensee, Wasserst.	2.6	2035	5*	3*	-6*	-1	-2*	-1	-3	-2*	-4**	-3*	-3	2*	-1*
Greifensee, Wasserst.	2.6	2060	2*	0	-7*	-4*	0*	5*	-2	0	-5*	-5*	-1	1	-1*
Greifensee, Wasserst.	2.6	2085	2*	2	-8*	-3	-1*	2	-2*	-1	-2*	-2	0	-2	-1
Greifensee, Wasserst.	4.5	2035	2	4	-1	-3	1	-1	-6*	-4**	-5**	-6	-1	3	-1
Greifensee, Wasserst.	4.5	2060	3	2	-4	-2	1	-1	-6*	-5**	-8*	-2	0	0	-3*
Greifensee, Wasserst.	4.5	2085	3*	2	-5	-1*	2*	4	-4*	-5*	-7*	-3	0	4	0
Greifensee, Wasserst.	8.5	2035	5*	2	-1	-2	2	3	-1	-3*	-5*	-5*	1	2*	0
Greifensee, Wasserst.	8.5	2060	6*	2	-2	0	4*	3*	-3	-6*	-9**	-6*	1	2	-1
Greifensee, Wasserst.	8.5	2085	6*	2	-2	-1	1	2	-7*	-10**	-14**	-10*	-3	2	-3*
Glatt, Dübendorf	2.6	2035	10*	7*	-13*	-4	-5*	-1	-9*	-8*	-10**	-11*	-10	3*	-3*
Glatt, Dübendorf	2.6	2060	6*	2	-15*	-11*	-1	17*	-5	-5	-16*	-15*	-2	1	-2*
Glatt, Dübendorf	2.6	2085	4*	6	-17*	-11	-4*	7	-8*	-1	-7*	-7	-1	-5	-3
Glatt, Dübendorf	4.5	2035	5	9	-3	-8	4	-4	-19*	-15**	-15*	-19	-1	8	-3
Glatt, Dübendorf	4.5	2060	7	4	-9	-6	4	-2	-20*	-21**	-22*	-4	2	-2	-6*
Glatt, Dübendorf	4.5	2085	8*	7*	-8	-2*	7*	12	-13*	-20*	-23*	-8*	0	9	0
Glatt, Dübendorf	8.5	2035	13*	7	-2	-5	6	10	-5	-14*	-17*	-13	2	4	1
Glatt, Dübendorf	8.5	2060	15*	5	-5	1	11*	11	-9	-22*	-28**	-18*	4	6	-1
Glatt, Dübendorf	8.5	2085	13*	6	-5	-2	5	7	-24*	-33**	-43**	-30*	-6	6	-7*
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2035	12*	6*	-12*	-2	-5	-2	-8*	-7*	-9**	-11*	-10	3*	-2*
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2060	6*	-1	-16*	-9	-2	16*	-9*	-5	-11*	-16*	-5	1	-3*
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2085	5*	3	-18*	-9	-6*	5*	-11*	-3	-7*	-7	0	-8	-2
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2035	4	7	-3	-2	7	5	-20*	-13**	-15**	-16	-1	6	-1
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2060	6	2	-7	-1	6	-2	-19*	-18*	-19*	-2	2	0	-5
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2085	7*	8*	-7	0	11*	11*	-11*	-18*	-21*	-10	-2	8*	2

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
			[%] [cm]												
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2035	11	6	-1	0	7	10	-5	-12*	-15*	-13	2	2	2
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2060	12*	6*	-4	7	12*	13*	-10	-17*	-24**	-16*	4	7	0
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2085	14*	7*	-3	5	9	10	-22*	-31**	-39**	-26*	-4	3	-6
Töss, Freienstein	2.6	2035	19*	3*	-18*	-4	-10*	-2	-15	-7*	-12*	-14*	-9	8*	-3*
Töss, Freienstein	2.6	2060	9	-3	-19*	-14	-5	18*	-13*	-6*	-14*	-15*	-6	5	-4*
Töss, Freienstein	2.6	2085	11*	2	-19*	-16	-9*	8	-15*	-3	-6**	-8	1	-8	-3*
Töss, Freienstein	4.5	2035	3	7	-4*	-5	1	1	-24*	-18**	-15**	-15	-1	12*	-3
Töss, Freienstein	4.5	2060	7*	1	-14	-7*	4	-7	-28*	-23*	-26*	-1	4	4	-7*
Töss, Freienstein	4.5	2085	15*	6*	-14	-5	5*	6	-19*	-26*	-23*	-5	0	14*	0
Töss, Freienstein	8.5	2035	10*	8*	-8*	-8	4	11	-11	-15*	-17*	-14	4	7	2
Töss, Freienstein	8.5	2060	12*	6	-6	0	8*	9	-17	-25*	-28**	-15*	8	10*	-2
Töss, Freienstein	8.5	2085	20*	7*	-8*	-8	2	4	-32*	-40**	-43**	-27*	-1	11	-9
Furtbach, Würenlos	2.6	2035	13*	4*	-11*	0	-3	-2	-8*	-8*	-11	-13*	-11*	5*	-2
Furtbach, Würenlos	2.6	2060	7*	-6	-14*	-6*	-2	11*	-10*	-9*	-2	-22	-11*	2	-3*
Furtbach, Würenlos	2.6	2085	5*	-1	-13*	-8	-4*	3	-15*	-10	-8*	-8*	0	-9	-2
Furtbach, Würenlos	4.5	2035	2	5	-3	8	11*	3	-13*	-12*	-15**	-10	-2	2	1
Furtbach, Würenlos	4.5	2060	4	1	0	2	7	0	-21*	-14*	-16*	-3	0	2	-2
Furtbach, Würenlos	4.5	2085	5*	9*	-4	10	17**	3	-12*	-16	-16*	-11*	-1	15*	3
Furtbach, Würenlos	8.5	2035	10	9*	0	8*	6	5*	-3	-7	-10*	-14	2	2	3
Furtbach, Würenlos	8.5	2060	10*	7	-1	13*	12*	19*	-7	-7*	-17*	-14*	5	8	4*
Furtbach, Würenlos	8.5	2085	16*	9*	2	14	12*	11	-18*	-21*	-32**	-24*	-4	2	-1
Zürichsee, Wasserst.	2.6	2035	1*	2*	0	1	0	-1*	-2**	-1*	-1**	0	0	0	0
Zürichsee, Wasserst.	2.6	2060	2**	2**	0	1*	0	0	-2*	-1*	-2*	-1*	0	1*	0
Zürichsee, Wasserst.	2.6	2085	1**	1*	0	1*	0	0*	-2**	-1	-1**	-1	0	0	0
Zürichsee, Wasserst.	4.5	2035	1*	2*	1*	0	0	0	-3*	-2**	-2**	-2	0	1*	0
Zürichsee, Wasserst.	4.5	2060	2*	2*	1*	0	-1	-2**	-4**	-2*	-3*	-1*	0	1	-1*
Zürichsee, Wasserst.	4.5	2085	2*	4*	2*	1*	0	-1	-3*	-2*	-3*	-1*	0	1*	0
Zürichsee, Wasserst.	8.5	2035	1*	2**	1*	1	0	0	-2	-2**	-2*	-1*	0	1*	0
Zürichsee, Wasserst.	8.5	2060	3*	3**	3**	1**	0	-2	-3*	-3*	-3**	-2*	0	1*	0
Zürichsee, Wasserst.	8.5	2085	4**	5**	4**	1	-2*	-3*	-4**	-5**	-5**	-2*	0	1*	-1*
Limmat, Zürich	2.6	2035	12*	11*	-3*	6	-3	-12*	-11**	-13*	-11**	-4	-5	4	-2*
Limmat, Zürich	2.6	2060	15**	10**	-1	7*	-4	-3	-14*	-8*	-16*	-6*	0	8*	-2
Limmat, Zürich	2.6	2085	12**	6*	-1	6*	-2	-4*	-16**	-8	-11**	-3	-2	3	-2
Limmat, Zürich	4.5	2035	9*	13*	5*	2	1	-2	-20*	-18**	-14**	-14	-1	8*	-2*
Limmat, Zürich	4.5	2060	14*	16*	3	3	-4*	-17**	-23**	-24**	-25*	-4	3	6	-7*
Limmat, Zürich	4.5	2085	19*	24*	10*	5*	-1	-11*	-27**	-18*	-23*	-5*	1	13*	0
Limmat, Zürich	8.5	2035	13*	12**	8	5*	-1	0	-11	-16*	-16*	-10*	0	12*	0
Limmat, Zürich	8.5	2060	21*	17**	16**	13**	-2	-14*	-23*	-27**	-23**	-14*	5	13*	-3*
Limmat, Zürich	8.5	2085	31**	31**	20**	10*	-18*	-27**	-36**	-40**	-38**	-20*	-1	16*	-9*

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
			[%] [cm]												
Sihl, Zürich	2.6	2035	18*	7*	-9*	-8	-15*	-3*	-14	-7*	-10*	0	-3	7*	-3*
Sihl, Zürich	2.6	2060	15*	4	-8*	-8*	-14*	15	-13*	-3	-14*	-3	2	10*	-2*
Sihl, Zürich	2.6	2085	15*	7	-9*	-10**	-14**	13	-8	2	-6**	1*	5*	-3	-3*
Sihl, Zürich	4.5	2035	8*	14	-1	-14	-10*	-3	-19*	-12*	-14*	-13	1	15*	-4*
Sihl, Zürich	4.5	2060	15*	11	-9*	-16**	-14*	-7	-18*	-13*	-22*	2	11	9	-6*
Sihl, Zürich	4.5	2085	19*	11*	-8	-16**	-11*	-2	-19*	-9*	-17*	-2	3	18*	-1*
Sihl, Zürich	8.5	2035	13*	7*	-5	-11	-6*	7	-10	-14*	-14*	-9*	5	13	0
Sihl, Zürich	8.5	2060	20*	13*	-2	-12*	-8	7	-14	-18*	-20**	-9*	11*	12*	-3*
Sihl, Zürich	8.5	2085	31*	17*	-10	-26*	-17*	-2	-23*	-28**	-30**	-11*	13	18*	-8*
Thur, Andelfingen	2.6	2035	25*	7*	-13*	-4	-15*	-5	-14	-5*	-12*	-14	-7	9*	-2*
Thur, Andelfingen	2.6	2060	13*	1	-14*	-13*	-9	13*	-13*	-3	-16*	-11*	-5	8	-4*
Thur, Andelfingen	2.6	2085	15*	5	-11*	-16	-10*	6	-12*	2	-8**	-9	-1	-5	-4*
Thur, Andelfingen	4.5	2035	6*	10	-1	-8	-7	-8	-23*	-18*	-12*	-16	3	18*	-3
Thur, Andelfingen	4.5	2060	14*	5	-9	-11*	-4	-10*	-24**	-24*	-32*	-3	6*	6	-7*
Thur, Andelfingen	4.5	2085	20*	13*	-5	-11*	-6	3	-22*	-24*	-26*	-2	1	18*	-1
Thur, Andelfingen	8.5	2035	13*	12*	-5	-8	-3	9	-11	-16*	-14*	-14	6	13*	1
Thur, Andelfingen	8.5	2060	21*	12*	-1	-7*	-2	2	-19*	-25*	-27**	-13*	10	14*	-3
Thur, Andelfingen	8.5	2085	35*	15*	-8	-16*	-17*	-1	-35*	-42**	-44**	-19*	5	19*	-10*
Rhein, Neuhausen	2.6	2035	4*	7*	2*	1	2	-1	-7**	-10**	-12**	-7*	-3	-1	-2
Rhein, Neuhausen	2.6	2060	9**	12**	4*	2*	2*	3	-1	-7*	-13*	-9*	-4*	1*	0
Rhein, Neuhausen	2.6	2085	8*	8*	2*	3	3*	0	-5*	-10*	-10*	-8*	-2	2	0
Rhein, Neuhausen	4.5	2035	8*	10*	6*	1	3*	3	-9*	-17**	-15**	-10*	-7	1	-2*
Rhein, Neuhausen	4.5	2060	4*	14*	9*	4	3	-5	-15**	-22**	-19**	-14*	-7	-4	-5*
Rhein, Neuhausen	4.5	2085	13*	15*	13*	9*	4*	0	-9*	-18**	-24**	-17*	-2*	3*	0
Rhein, Neuhausen	8.5	2035	7*	10*	13*	6*	7*	4	-1	-13**	-15*	-11*	-8	0	0
Rhein, Neuhausen	8.5	2060	10*	12*	13**	13**	9**	0	-13*	-25**	-23**	-18*	-9	3	-2
Rhein, Neuhausen	8.5	2085	15*	24*	23**	16**	3	-13*	-29**	-38**	-39**	-28**	-15*	-2	-6*
Rhein, Rekingen	2.6	2035	8*	7*	-3*	1	0	-2	-7**	-10**	-11**	-8*	-4	-1	-2*
Rhein, Rekingen	2.6	2060	9**	9*	0	0	1	3	-2	-8*	-14*	-9*	-4	2	0
Rhein, Rekingen	2.6	2085	7*	6*	-1	2	0	0	-4**	-8*	-11*	-6*	-2	3	-1
Rhein, Rekingen	4.5	2035	8*	10*	5	-2	2*	3	-9*	-16**	-15**	-10*	-5	3	-2*
Rhein, Rekingen	4.5	2060	9*	12*	5	2	2	-3	-15**	-21**	-21**	-10*	-5	-7	-6*
Rhein, Rekingen	4.5	2085	12*	16*	8*	5*	4*	4	-10*	-18**	-26**	-14*	-1*	6	0
Rhein, Rekingen	8.5	2035	9*	11*	9*	4*	5	4	-2	-13**	-16*	-12*	-5	2	1
Rhein, Rekingen	8.5	2060	10*	10*	10*	9*	7*	3	-14*	-25*	-22**	-17*	-6	8	-2
Rhein, Rekingen	8.5	2085	17*	22*	16**	12*	1	-11	-30**	-38**	-40**	-27**	-12*	2	-6*
Reuss, Mellingen	2.6	2035	22*	15*	-3*	6	1	-9*	-17**	-18**	-14**	-3	-3	8	-4*
Reuss, Mellingen	2.6	2060	24**	13**	-1	8	0	3	-18**	-18*	-22*	-4*	4*	14*	-2*
Reuss, Mellingen	2.6	2085	24**	12*	-1	6	0	-2	-20**	-18*	-17**	-5*	-1	7*	-3*

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
			[%] [cm]												
Reuss, Mellingen	4.5	2035	14*	18*	5*	2	3	-2	-23**	-24**	-18**	-9	0	13**	-2*
Reuss, Mellingen	4.5	2060	24*	24*	4	2	-2	-13*	-27**	-31**	-25*	-2	4	9*	-7*
Reuss, Mellingen	4.5	2085	31*	32*	9*	4*	1	-8	-29**	-31**	-31**	-9	3	20*	-2*
Reuss, Mellingen	8.5	2035	21*	14*	8	4	3	3	-15*	-22**	-19*	-10*	2	19*	-2
Reuss, Mellingen	8.5	2060	35**	25**	17*	12*	3	-11*	-30**	-38**	-29**	-14*	8*	20*	-5
Reuss, Mellingen	8.5	2085	55**	46**	21**	11*	-12*	-29**	-45**	-51**	-45**	-22*	10	29**	-9*

Tabelle 5.3 Gemessene Monats- und Jahresmittelwerte der Referenzperiode für Abflüsse in m³/s und Wasserstände in m ü.M. für die Reppisch (Dietikon), den Greifensee, die Glatt (Dübendorf, Rheinsfelden), die Töss (Freienstein), den Furtbach (Würenlos), den Zürichsee, die Limmat (Zürich), die Sihl (Zürich), die Thur (Andelfingen), den Rhein (Neuhausen, Rekingen) und die Reuss (Mühlau).

Fließgewässer, Ort	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
		[m ³ /s] [m ü.M.]												
Reppisch, Dietikon	Ref	1.2	1.2	1.6	1.6	1.5	1.5	1.0	0.9	0.8	0.8	1.1	1.4	1.2
Greifensee, Wasserst.	Ref	435.23	435.21	435.25	435.25	435.21	435.26	435.17	435.15	435.17	435.16	435.18	435.23	435.20
Glatt, Dübendorf	Ref	4.7	4.5	5.1	5.1	4.5	5.2	3.8	3.6	3.9	3.7	3.9	4.7	4.4
Glatt, Rheinsfelden	Ref	9.1	8.8	9.7	9.2	8.3	8.8	7.0	6.7	7.0	7.0	7.6	9.2	8.2
Töss, Freienstein	Ref	9.3	9.3	12.8	11.5	9.7	9.8	6.9	6.4	6.5	6.5	8.3	10.5	9.0
Furtbach, Würenlos	Ref	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.7
Zürichsee, Wasserst.	Ref	405.81	405.74	405.79	405.95	406.04	406.06	406.04	406.03	406.03	405.97	405.94	405.91	405.94
Limmat, Zürich	Ref	64	67	71	87	119	136	113	96	91	71	68	71	88
Sihl, Zürich	Ref	5.4	5.5	8.1	8.7	8.1	8.2	7.3	7.2	6.6	5.2	5.5	6.0	6.8
Thur, Andelfingen	Ref	43	41	62	62	58	57	46	41	44	35	38	49	48
Rhein, Neuhausen	Ref	258	246	270	333	438	567	542	459	397	346	292	282	370
Rhein, Rekingen	Ref	332	318	369	431	530	656	616	527	468	409	359	364	449
Reuss, Mellingen	Ref	75	74	103	136	207	252	225	187	147	108	87	85	141

Tabelle 5.4 Berechnete mögliche zukünftige Monats- und Jahresabflussmediane in m³/s (oder Wasserstände in m ü.M.) für die Reppisch (Dietikon), den Greifensee, die Glatt (Dübendorf, Rheinsfelden), die Töss (Freienstein), den Furtbach (Würenlos), den Zürichsee, die Limmat (Zürich), die Sihl (Zürich), die Thur (Andelfingen), den Rhein (Neuhausen, Rekingen) und die Reuss (Mühlau). Die Werte wurden berechnet aus den gemessenen Monats- und Jahresmittelwerten der Referenzperiode (Tabelle 5.3) und den Medianen der relativen Veränderungen zur Referenzperiode (Tabelle 5.2). Die Labels * und ** wurden aus Tabelle 5.2 übernommen. Alle hier dargestellten Werte sollten mit äusserster Vorsicht verwendet werden, da die komplette Klimaunsicherheit der verschiedenen Modellketten nicht berücksichtigt wurde!

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
			[m ³ /s] [m ü.M.]												
Reppisch, Dietikon	2.6	2035	1.3*	1.2*	1.4*	1.6	1.5*	1.4	0.9**	0.8*	0.7*	0.7*	1.0	1.4	1.2*
Reppisch, Dietikon	2.6	2060	1.3	1.2	1.3*	1.5	1.5	1.7*	0.9*	0.8*	0.7*	0.6*	1.0*	1.4	1.2*
Reppisch, Dietikon	2.6	2085	1.3*	1.2	1.3*	1.4	1.4*	1.5	0.9*	0.8	0.7	0.7*	1.1	1.3	1.2
Reppisch, Dietikon	4.5	2035	1.2	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6	0.8*	0.8*	0.6**	0.7	1.0	1.5	1.2
Reppisch, Dietikon	4.5	2060	1.3	1.2	1.4	1.6	1.6	1.4	0.8*	0.7*	0.7*	0.8	1.1	1.4	1.1*
Reppisch, Dietikon	4.5	2085	1.3*	1.3*	1.4	1.6	1.7*	1.5*	0.9*	0.7	0.7**	0.7*	1.1	1.6*	1.2
Reppisch, Dietikon	8.5	2035	1.3	1.3	1.5*	1.6	1.6	1.6	1.0	0.8	0.7*	0.7	1.1	1.4	1.2
Reppisch, Dietikon	8.5	2060	1.3*	1.2	1.5	1.7	1.6*	1.7*	0.9	0.8*	0.6**	0.6*	1.1	1.5	1.2
Reppisch, Dietikon	8.5	2085	1.4*	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6	0.8*	0.6**	0.5**	0.6*	1.0	1.4	1.1
Greifensee, Wasserst.	2.6	2035	435.28*	435.24*	435.19*	435.24	435.19*	435.25	435.14	435.13*	435.13**	435.13*	435.15	435.25*	435.19*
Greifensee, Wasserst.	2.6	2060	435.25*	435.21	435.18*	435.21*	435.21*	435.31*	435.15	435.15	435.12*	435.11*	435.17	435.24	435.19*
Greifensee, Wasserst.	2.6	2085	435.25*	435.23	435.17*	435.22	435.20*	435.28	435.15*	435.14	435.15*	435.14	435.18	435.21	435.19
Greifensee, Wasserst.	4.5	2035	435.25	435.25	435.24	435.22	435.22	435.25	435.11*	435.11**	435.12**	435.1	435.17	435.26	435.19
Greifensee, Wasserst.	4.5	2060	435.26	435.23	435.21	435.23	435.22	435.25	435.11*	435.10**	435.09*	435.14	435.18	435.23	435.17*
Greifensee, Wasserst.	4.5	2085	435.26*	435.23	435.2	435.24*	435.23*	435.3	435.13*	435.10*	435.10*	435.13	435.18	435.27	435.2
Greifensee, Wasserst.	8.5	2035	435.28*	435.23	435.24	435.23	435.23	435.29	435.16	435.12*	435.12*	435.11*	435.19	435.25*	435.2
Greifensee, Wasserst.	8.5	2060	435.29*	435.23	435.23	435.25	435.25*	435.29*	435.14	435.09*	435.08**	435.10*	435.19	435.25	435.19
Greifensee, Wasserst.	8.5	2085	435.29*	435.23	435.23	435.24	435.22	435.28	435.10*	435.05**	435.03**	435.06*	435.15	435.25	435.17*
Glatt, Dübendorf	2.6	2035	5.2*	4.8*	4.4*	4.9	4.3*	5.1	3.5*	3.3*	3.5**	3.3*	3.5	4.8*	4.3*
Glatt, Dübendorf	2.6	2060	5.0*	4.6	4.3*	4.5*	4.5	6.1*	3.6	3.4	3.3*	3.1*	3.8	4.7	4.3*
Glatt, Dübendorf	2.6	2085	4.9*	4.8	4.2*	4.5	4.3*	5.6	3.5*	3.6	3.6*	3.4	3.9	4.5	4.3
Glatt, Dübendorf	4.5	2035	4.9	4.9	4.9	4.7	4.7	5	3.1*	3.1**	3.3*	3	3.9	5.1	4.3
Glatt, Dübendorf	4.5	2060	5	4.7	4.6	4.8	4.7	5.1	3.0*	2.8**	3.0*	3.6	4	4.6	4.1*
Glatt, Dübendorf	4.5	2085	5.1*	4.8*	4.7	5.0*	4.8*	5.8	3.3*	2.9*	3.0*	3.4*	3.9	5.1	4.4
Glatt, Dübendorf	8.5	2035	5.3*	4.8	5	4.8	4.8	5.7	3.6	3.1*	3.2*	3.2	4	4.9	4.4
Glatt, Dübendorf	8.5	2060	5.4*	4.7	4.8	5.2	5.0*	5.8	3.5	2.8*	2.8**	3.0*	4.1	5	4.4
Glatt, Dübendorf	8.5	2085	5.3*	4.8	4.8	5	4.7	5.6	2.9*	2.4**	2.2**	2.6*	3.7	5	4.1*
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2035	10.2*	9.3*	8.5*	9	7.9	8.6	6.4*	6.2*	6.4**	6.2*	6.8	9.5*	8.0*
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2060	9.6*	8.7	8.1*	8.4	8.1	10.2*	6.4*	6.4	6.2*	5.9*	7.2	9.3	8.0*
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2085	9.6*	9.1	8.0*	8.4	7.8*	9.2*	6.2*	6.5	6.5*	6.5	7.6	8.5	8
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2035	9.5	9.4	9.4	9	8.9	9.2	5.6*	5.8**	6.0**	5.9	7.5	9.8	8.1
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2060	9.6	9	9	9.1	8.8	8.6	5.7*	5.5*	5.7*	6.9	7.8	9.2	7.8
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2085	9.7*	9.5*	9	9.2	9.2*	9.8*	6.2*	5.5*	5.5*	6.3	7.4	9.9*	8.4

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
			[m ³ /s] [m ü.M.]												
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2035	10.1	9.3	9.6	9.2	8.9	9.7	6.7	5.9*	6.0*	6.1	7.8	9.4	8.4
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2060	10.2*	9.3*	9.3	9.8	9.3*	9.9*	6.3	5.6*	5.3**	5.9*	7.9	9.8	8.2
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2085	10.4*	9.4*	9.4	9.7	9	9.7	5.5*	4.6**	4.3**	5.2*	7.3	9.5	7.7
Töss, Freienstein	2.6	2035	11.1*	9.6*	10.5*	11	8.7*	9.6	5.9	6.0*	5.7*	5.6*	7.6	11.3*	8.7*
Töss, Freienstein	2.6	2060	10.1	9	10.4*	9.9	9.2	11.6*	6.0*	6.0*	5.6*	5.5*	7.8	11	8.6*
Töss, Freienstein	2.6	2085	10.3*	9.5	10.4*	9.7	8.8*	10.6	5.9*	6.2	6.1**	6	8.4	9.7	8.7*
Töss, Freienstein	4.5	2035	9.6	10	12.3*	10.9	9.8	9.9	5.2*	5.2**	5.5**	5.5	8.2	11.8*	8.7
Töss, Freienstein	4.5	2060	10.0*	9.4	11	10.7*	10.1	9.1	5.0*	4.9*	4.8*	6.4	8.6	10.9	8.4*
Töss, Freienstein	4.5	2085	10.7*	9.9*	11	10.9	10.2*	10.4	5.6*	4.7*	5.0*	6.2	8.3	12.0*	9
Töss, Freienstein	8.5	2035	10.2*	10.0*	11.8*	10.6	10.1	10.9	6.1	5.4*	5.4*	5.6	8.6	11.2	9.2
Töss, Freienstein	8.5	2060	10.4*	9.9	12	11.5	10.5*	10.7	5.7	4.8*	4.7**	5.5*	9	11.6*	8.8
Töss, Freienstein	8.5	2085	11.2*	10.0*	11.8*	10.6	9.9	10.2	4.7*	3.8**	3.7**	4.7*	8.2	11.7	8.2
Furtbach, Würenlos	2.6	2035	0.9*	0.8*	0.8*	0.8	0.7	0.6	0.5*	0.4*	0.4	0.4*	0.5*	0.8*	0.7
Furtbach, Würenlos	2.6	2060	0.9*	0.8	0.8*	0.8*	0.7	0.7*	0.4*	0.4*	0.4	0.4	0.5*	0.8	0.7*
Furtbach, Würenlos	2.6	2085	0.8*	0.8	0.8*	0.7	0.7*	0.6	0.4*	0.4	0.4*	0.5*	0.6	0.7	0.7
Furtbach, Würenlos	4.5	2035	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8*	0.6	0.4*	0.4*	0.3**	0.4	0.6	0.8	0.7
Furtbach, Würenlos	4.5	2060	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4*	0.3*	0.3*	0.5	0.6	0.8	0.7
Furtbach, Würenlos	4.5	2085	0.8*	0.9*	0.9	0.9	0.8**	0.6	0.4*	0.3	0.3*	0.4*	0.6	0.9*	0.7
Furtbach, Würenlos	8.5	2035	0.9	0.9*	0.9	0.9*	0.7	0.6*	0.5	0.4	0.4*	0.4	0.6	0.8	0.7
Furtbach, Würenlos	8.5	2060	0.9*	0.9	0.9	0.9*	0.8*	0.7*	0.5	0.4*	0.3*	0.4*	0.6	0.9	0.7*
Furtbach, Würenlos	8.5	2085	0.9*	0.9*	0.9	0.9	0.8*	0.7	0.4*	0.3*	0.3**	0.4*	0.6	0.8	0.7
Zürichsee, Wasserst.	2.6	2035	405.82*	405.76*	405.79	405.96	406.04	406.05*	406.02**	406.02*	406.02**	405.97	405.94	405.91	405.94
Zürichsee, Wasserst.	2.6	2060	405.83**	405.76**	405.79	405.96*	406.04	406.06	406.02*	406.02*	406.01*	405.96*	405.94	405.92*	405.94
Zürichsee, Wasserst.	2.6	2085	405.82**	405.75*	405.79	405.96*	406.04	406.06*	406.02**	406.02	406.02**	405.96	405.94	405.91	405.94
Zürichsee, Wasserst.	4.5	2035	405.82*	405.76*	405.80*	405.95	406.04	406.06	406.01*	406.01**	406.01**	405.95	405.94	405.92*	405.94
Zürichsee, Wasserst.	4.5	2060	405.83*	405.76*	405.80*	405.95	406.03	406.04**	406.00**	406.01*	406.00*	405.96*	405.94	405.92	405.93*
Zürichsee, Wasserst.	4.5	2085	405.83*	405.78*	405.81*	405.96*	406.04	406.05	406.01*	406.01*	406.00*	405.96*	405.94	405.92*	405.94
Zürichsee, Wasserst.	8.5	2035	405.82*	405.76**	405.80*	405.96	406.04	406.06	406.02	406.01**	406.01*	405.96*	405.94	405.92*	405.94
Zürichsee, Wasserst.	8.5	2060	405.84*	405.77**	405.82**	405.96**	406.04	406.04	406.01*	406.00*	406.00**	405.95*	405.94	405.92*	405.94
Zürichsee, Wasserst.	8.5	2085	405.85**	405.79**	405.83**	405.96	406.02*	406.03*	406.00**	405.98**	405.98**	405.95*	405.94	405.92*	405.93*
Limmat, Zürich	2.6	2035	72*	74*	69*	92	115	120*	101**	84*	81**	68	65	74	86*
Limmat, Zürich	2.6	2060	74**	74**	70	93*	114	132	97*	88*	76*	67*	68	77*	86
Limmat, Zürich	2.6	2085	72**	71*	70	92*	117	131*	95**	88	81**	69	67	73	86
Limmat, Zürich	4.5	2035	70*	76*	75*	89	120	133	90*	79**	78**	61	67	77*	86*
Limmat, Zürich	4.5	2060	73*	78*	73	90	114*	113**	87**	73**	68*	68	70	75	82*
Limmat, Zürich	4.5	2085	76*	83*	78*	91*	118	121*	82**	79*	70*	67*	69	80*	88
Limmat, Zürich	8.5	2035	72*	75**	77	91*	118	136	101	81*	76*	64*	68	80*	88
Limmat, Zürich	8.5	2060	77*	78**	82**	98**	117	117*	87*	70**	70**	61*	71	80*	85*
Limmat, Zürich	8.5	2085	84**	88**	85**	96*	98*	99**	72**	58**	56**	57*	67	82*	80*

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr	
			[m ³ /s]													
			[m ü.M.]													
Sihl, Zürich	2.6	2035	6.4*	5.9*	7.4*	8	6.9*	8.0*	6.3	6.7*	5.9*	5.2	5.3	6.4*	6.6*	
Sihl, Zürich	2.6	2060	6.2*	5.7	7.5*	8.0*	7.0*	9.4	6.4*	7	5.7*	5	5.6	6.6*	6.7*	
Sihl, Zürich	2.6	2085	6.2*	5.9	7.4*	7.8**	7.0**	9.3	6.7	7.3	6.2**	5.3*	5.8*	5.8	6.6*	
Sihl, Zürich	4.5	2035	5.8*	6.3	8	7.5	7.3*	8	5.9*	6.3*	5.7*	4.5	5.6	6.9*	6.5*	
Sihl, Zürich	4.5	2060	6.2*	6.1	7.4*	7.3**	7.0*	7.6	6.0*	6.3*	5.1*	5.3	6.1	6.5	6.4*	
Sihl, Zürich	4.5	2085	6.4*	6.1*	7.5	7.3**	7.2*	8	5.9*	6.6*	5.5*	5.1	5.7	7.1*	6.7*	
Sihl, Zürich	8.5	2035	6.1*	5.9*	7.7	7.7	7.6*	8.8	6.6	6.2*	5.7*	4.7*	5.8	6.8	6.8	
Sihl, Zürich	8.5	2060	6.5*	6.2*	7.9	7.7*	7.5	8.8	6.3	5.9*	5.3**	4.7*	6.1*	6.7*	6.6*	
Sihl, Zürich	8.5	2085	7.1*	6.4*	7.3	6.4*	6.7*	8	5.6*	5.2**	4.6**	4.6*	6.2	7.1*	6.3*	
Thur, Andelfingen	2.6	2035	54*	44*	54*	60	49*	54	40	39*	39*	30	35	53*	47*	
Thur, Andelfingen	2.6	2060	49*	41	53*	54*	53	64*	40*	40	37*	31*	36	53	46*	
Thur, Andelfingen	2.6	2085	49*	43	55*	52	52*	60	40*	42	40**	32	38	47	46*	
Thur, Andelfingen	4.5	2035	46*	45	61	57	54	52	35*	34*	39*	29	39	58*	47	
Thur, Andelfingen	4.5	2060	49*	43	56	55*	56	51*	35**	31*	30*	34	40*	52	45*	
Thur, Andelfingen	4.5	2085	52*	46*	59	55*	55	59	36*	31*	33*	34	38	58*	48	
Thur, Andelfingen	8.5	2035	49*	46*	59	57	56	62	41	34*	38*	30	40	55*	48	
Thur, Andelfingen	8.5	2060	52*	46*	61	58*	57	58	37*	31*	32**	30*	42	56*	47	
Thur, Andelfingen	8.5	2085	58*	47*	57	52*	48*	56	30*	24**	25**	28*	40	58*	43*	
Rhein, Neuhausen	2.6	2035	268*	263*	275*	336	447	561	504**	413**	349**	322*	283	279	363	
Rhein, Neuhausen	2.6	2060	281**	276**	281*	340*	447*	584	537	427*	345*	315*	280*	285*	370	
Rhein, Neuhausen	2.6	2085	279*	266*	275*	343	451*	567	515*	413*	357*	318*	286	288	370	
Rhein, Neuhausen	4.5	2035	279*	271*	286*	336	451*	584	493*	381**	337**	311*	272	285	363*	
Rhein, Neuhausen	4.5	2060	268*	280*	294*	346	451	539	461**	358**	322**	298*	272	271	352*	
Rhein, Neuhausen	4.5	2085	292*	283*	305*	363*	456*	567	493*	376**	302**	287*	286*	290*	370	
Rhein, Neuhausen	8.5	2035	276*	271*	305*	353*	469*	590	537	399**	337*	308*	269	282	370	
Rhein, Neuhausen	8.5	2060	284*	276*	305**	376**	477**	567	472*	344**	306**	284*	266	290	363	
Rhein, Neuhausen	8.5	2085	297*	305*	332**	386**	451	493*	385**	285**	242**	249**	248*	276	348*	
Rhein, Rekingen	2.6	2035	359*	340*	358*	435	530	643	573**	474**	417**	376*	345	360	440*	
Rhein, Rekingen	2.6	2060	362**	347*	369	431	535	676	604	485*	402*	372*	345	371	449	
Rhein, Rekingen	2.6	2085	355*	337*	365	440	530	656	591**	485*	417*	384*	352	375	445	
Rhein, Rekingen	4.5	2035	359*	350*	387	422	541*	676	561*	443**	398**	368*	341	375	440*	
Rhein, Rekingen	4.5	2060	362*	356*	387	440	541	636	524**	416**	370**	368*	341	339	422*	
Rhein, Rekingen	4.5	2085	372*	369*	399*	453*	551*	682	554*	432**	346**	352*	355*	386	449	
Rhein, Rekingen	8.5	2035	362*	353*	402*	448*	556	682	604	458**	393*	360*	341	371	453	
Rhein, Rekingen	8.5	2060	365*	350*	406*	470*	567*	676	530*	395*	365**	339*	337	393	440	
Rhein, Rekingen	8.5	2085	388*	388*	428**	483*	535	584	431**	327**	281**	299**	316*	371	422*	
Reuss, Mellingen	2.6	2035	92*	85*	100*	144	209	229*	187**	153**	126**	105	84	92	135*	
Reuss, Mellingen	2.6	2060	93**	84**	102	147	207	260	184**	153*	115*	104*	90*	97*	138*	
Reuss, Mellingen	2.6	2085	93**	83*	102	144	207	247	180**	153*	122**	103*	86	91*	137*	

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Jan	Febr	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
			[m ³ /s] [m ü.M.]												
Reuss, Mellingen	4.5	2035	86*	87*	108*	139	213	247	173**	142**	121**	98	87	96**	138*
Reuss, Mellingen	4.5	2060	93*	92*	107	139	203	219*	164**	129**	110*	106	90	93*	131*
Reuss, Mellingen	4.5	2085	98*	98*	112*	141*	209	232	160**	129**	101**	98	90	102*	138*
Reuss, Mellingen	8.5	2035	91*	84*	111	141	213	260	191*	146**	119*	97*	89	101*	138
Reuss, Mellingen	8.5	2060	101**	92**	121*	152*	213	224*	158**	116**	104**	93*	94*	102*	134
Reuss, Mellingen	8.5	2085	116**	108**	125**	151*	182*	179**	124**	92**	81**	84*	96	110**	128*

5.5 Veränderung des Niedrigwassers

In diesem Abschnitt werden die Veränderungen der Abflüsse im Niedrigwasserbereich aller Flusseinzugsgebiete präsentiert. Analysen für die Wasserstände des Greifensees und des Zürichsees wurden nicht gemacht, da Wasserstände per Definition nicht mit Q_{347} beschrieben werden.

5.5.1 Reppisch

Bei den tiefsten Abflüssen, betrachtet über jeweils 30 Jahre (Abbildung 5.16), ist ein Trend zur Abflussabnahme zu erkennen. Bei der Veränderung von Q_{347} im Vergleich zur Referenzperiode (Abbildung 5.27) ist eine Abnahme zu erkennen und VZ_{75} wurde unter RCP 2.6 und 8.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 4.5 in allen Zeitperioden erreicht (Tabelle 5.5). Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 kann bei Q_{347} mit einer Reduktion von 24 % (VZ_{75}) gerechnet werden. Dies entspricht einem Rückgang von 0.26 m³/s auf 0.20 m³/s. Im Vergleich zu den Veränderungen der Jahresmittelwerte ist die Variabilität der Modellketten bei Q_{347} aber hoch, was die Unsicherheit erhöht und die Verlässlichkeit der Medianwerte in Tabelle 5.5 senkt.

5.5.2 Glatt

Bei den tiefen Abflüssen, über 30 Jahre (Abbildung 5.17, Abbildung 5.18), ist ein Trend zu noch tiefen Abflüssen vorhanden. VZ_{75} ist bei Q_{347} (Abbildung 5.27) unter RCP 2.6 für die nahe und ferne Zukunft, unter RCP 4.5 für alle Zeitperioden und unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft gegeben (Tabelle 5.5). In Dübendorf ist VZ_{75} zusätzlich unter RCP 8.5 für die mittlere Zukunft, sowie VZ_{100} unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft und unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft gegeben. In Dübendorf ist bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 bei Q_{347} mit einer Reduktion von 28 % (VZ_{100}) zu rechnen. Dies entspricht einer Abnahme von 1.56 m³/s auf 1.12 m³/s. In Rheinsfelden ist mit einer Reduktion um 25 % (VZ_{75}) zu rechnen, was einer Abnahme von 3.41 m³/s auf 2.56 m³/s entspricht. An beiden Standorten ist die Variabilität der Modellketten für Q_{347} höher als für die Jahresmittelwerte.

5.5.3 Töss

Die tiefen Abflüsse über 30 Jahre betrachtet (Abbildung 5.21) zeigen einen Trend zu noch tieferen Abflüssen. Bei Q_{347} ist mit einer Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.27). Unter RCP 2.6 ist VZ_{75} für die nahe und ferne Zukunft gegeben (Tabelle 5.5), bei der nahen Zukunft sogar mit VZ_{100} . Unter RCP 4.5 ist VZ_{75} für alle Zeitperioden gegeben und unter RCP 8.5 für die mittlere und ferne Zukunft. Bis Ende Jahrhundert ist unter RCP 8.5 eine Reduktion von Q_{347} um 34 % (VZ_{75}) zu erwarten. Dies entspricht einer Abnahme von 2.49 m³/s auf 1.64 m³/s. Die Variabilität der Modellketten bei Q_{347} ist grösser als bei den Jahresmittelwerten.

5.5.4 Furtbach

Über 30 Jahre betrachtet ist mit einer Abflussabnahme bei den tiefen Abflüssen zu rechnen (Abbildung 5.20). Der Trend für die künftige Veränderung von Q_{347} (Abbildung 5.27) ist allerdings nicht eindeutig. Die Variabilität der Modellketten ist gross und vergleichbar mit der Variabilität der Jahresmittelwerte. Nur unter RCP 2.6 und 8.5 für die ferne Zukunft und unter RCP 4.5 für die mittlere Zukunft ist VZ_{75} für eine Abflussabnahme gegeben (Tabelle 5.5). Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist mit einer Reduktion von Q_{347} um 18 % (VZ_{75}) zu rechnen. Dies entspricht einer Abflussabnahme von 0.20 m³/s auf 0.16 m³/s.

5.5.5 Limmat

Bei den tiefen Abflüssen über 30 Jahre in der Limmat (Abbildung 5.21) zeichnet sich dasselbe ab wie bei der Reppisch, der Glatt und der Töss. Sie werden eher tiefer ausfallen. Bei Q_{347} ist mit einer Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.27). Unter RCP 2.6 für die ferne Zukunft, unter RCP 4.5 für die mittlere Zukunft und unter RCP 8.5 für alle Zeitperioden ist VZ_{75} gegeben (Tabelle 5.5). Unter RCP 8.5 wird die Abnahme von der nahen zur fernen Zukunft stärker. Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist mit einer Reduktion von 37 % (VZ_{75}) zu rechnen. Dies entspricht einer Abnahme von 38 m³/s auf 24 m³/s. Die Variabilität der Modellketten bei Q_{347} ist grösser als bei den Jahresmittelwerten.

5.5.6 Sihl

Bei den tiefen Abflüssen, über 30 Jahre betrachtet, ist bei der Sihl keine eindeutige Veränderung zu erwarten (Abbildung 5.22). Bei Q_{347} ist unter allen RCPs für alle Zeitperioden, ausser unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft, mit einer leichten Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.28). VZ_{75} ist bei all diesen Werten gegeben, unter RCP 4.5 für die mittlere Zukunft und unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft sogar VZ_{100} (Tabelle 5.5). Wie bereits bei der Limmat wird unter RCP 8.5 die Abnahme von der nahen zur fernen Zukunft stärker. Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist nur mit einer kleinen Abnahme von 6 % (VZ_{100}) zu rechnen. Dies entspricht einer Reduktion von 2.83 m³/s auf 2.66 m³/s. Die Variabilität der Modellketten bei den Jahresmittelwerten ist bei der Sihl grösser als jene von Q_{347} .

5.5.7 Thur

Bei der Thur ist bei den tiefsten Abflüssen, über 30 Jahre betrachtet, mit einer Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.23). Bei Q_{347} ist ebenfalls mit einer Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.28). Unter allen RCPs und Zeitperioden, ausser unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft, ist VZ_{75} gegeben, unter RCP 2.6 für die nahe Zukunft und unter RCP 4.5 und 8.5 für die ferne Zukunft sogar VZ_{100} (Tabelle 5.5). Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist mit einer Abnahme von 41 % (VZ_{100}) zu rechnen. Dies entspricht einem Rückgang von 10 m³/s auf 6 m³/s. Die Variabilität der Modellketten von Q_{347} ist gross. Daneben ist die Variabilität der Modellketten bei den Jahresmittelwerten sehr klein.

5.5.8 Rhein

Rhein Neuhausen

Bei den tiefen Abflüssen, über 30 Jahre betrachtet, ist unter allen RCPs mit einer Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.24). Im Vergleich mit den zuvor beschriebenen kleineren Einzugsgebieten ist diese Reduktion bis Ende Jahrhundert grösser. Bei Q_{347} ist ebenfalls mit einer Abflussabnahme zu rechnen (Abbildung 5.28). Unter allen RCPs und Zeitperioden, ausser unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft, ist VZ_{75} gegeben, unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft VZ_{100} (Tabelle 5.5). Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist mit einer Abnahme von 30 % (VZ_{100}) zu rechnen. Dies entspricht einer Reduktion von 197 m³/s auf 138 m³/s. Die Variabilität der Modellketten ist bei den Veränderungen von Q_{347} deutlich höher als bei den Jahresmittelwerten.

Rhein Rekingen

Bei den tiefen Abflüssen, über 30 Jahre betrachtet (Abbildung 5.25), ist derselbe Trend ersichtlich wie bei Neuhausen. Es ist damit zu rechnen, dass die tiefen Abflüsse weiter abnehmen. Dies zeigt

sich auch bei Q_{347} (Abbildung 5.28). Unter allen RCPs und Zeitperioden, ausser unter RCP 2.6 für die mittlere Zukunft, ist VZ_{75} gegeben, unter RCP 8.5 für die ferne Zukunft VZ_{100} (Tabelle 5.5). Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist mit einer Abnahme um 33 % (VZ_{100}) zu rechnen. Dies entspricht einer Reduktion von 236 m³/s auf 158 m³/s. Die Variabilität der Modellketten bei Q_{347} ist grösser als diejenige der Jahresmittelwerte.

5.5.9 Reuss

Bei den tiefen Abflüssen, über 30 Jahre betrachtet, ist eine Abflussabnahme zu erwarten (Abbildung 5.26). Dasselbe gilt für Q_{347} (Abbildung 5.28). Unter allen RCPs und Zeitperioden ist mit einer Abnahme von Q_{347} zu rechnen. VZ_{75} ist für alle RCPs und Zeitperioden gegeben, ausser unter RCP 8.5 für die nahe Zukunft (Tabelle 5.5). Unter RCP 2.6 und 8.5 ist VZ_{100} gegeben. Bis Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 ist mit einer Abnahme von 35 % (VZ_{100}) zu rechnen. Dies entspricht einer Reduktion von 46 m³/s auf 30 m³/s. Die Variabilität der Modellketten bei Q_{347} ist unter RCP 2.6 vergleichbar mit der Variabilität der Modellketten der Jahresmittelwerte. Unter RCP 4.5 ist diese bei Q_{347} grösser und unter RCP 8.5 um einiges grösser.

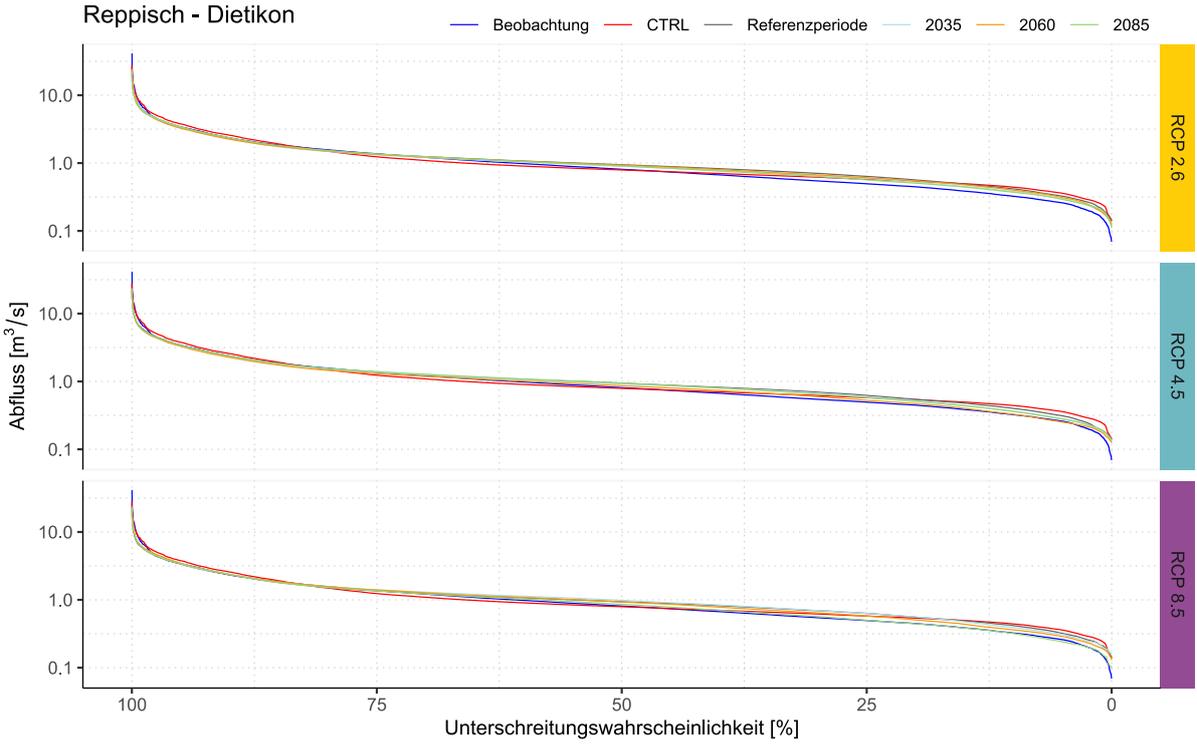


Abbildung 5.16 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Reppisch in Dietikon, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

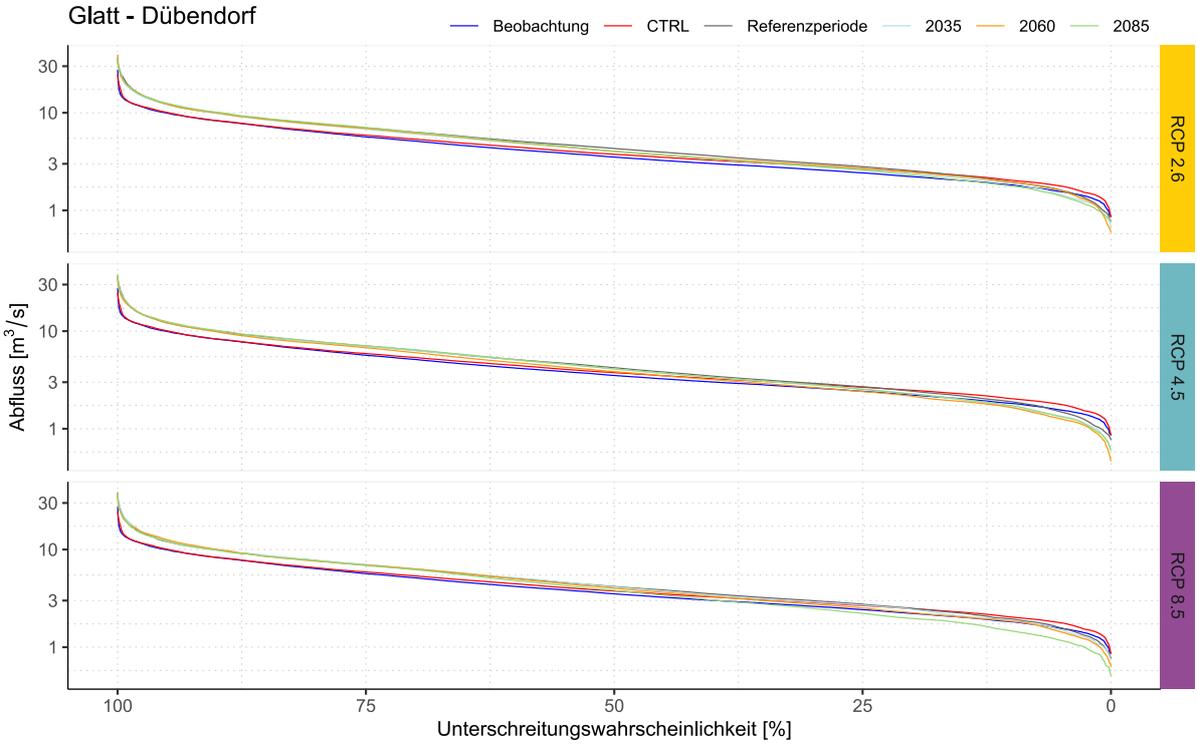


Abbildung 5.17 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Glatt in Dübendorf, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

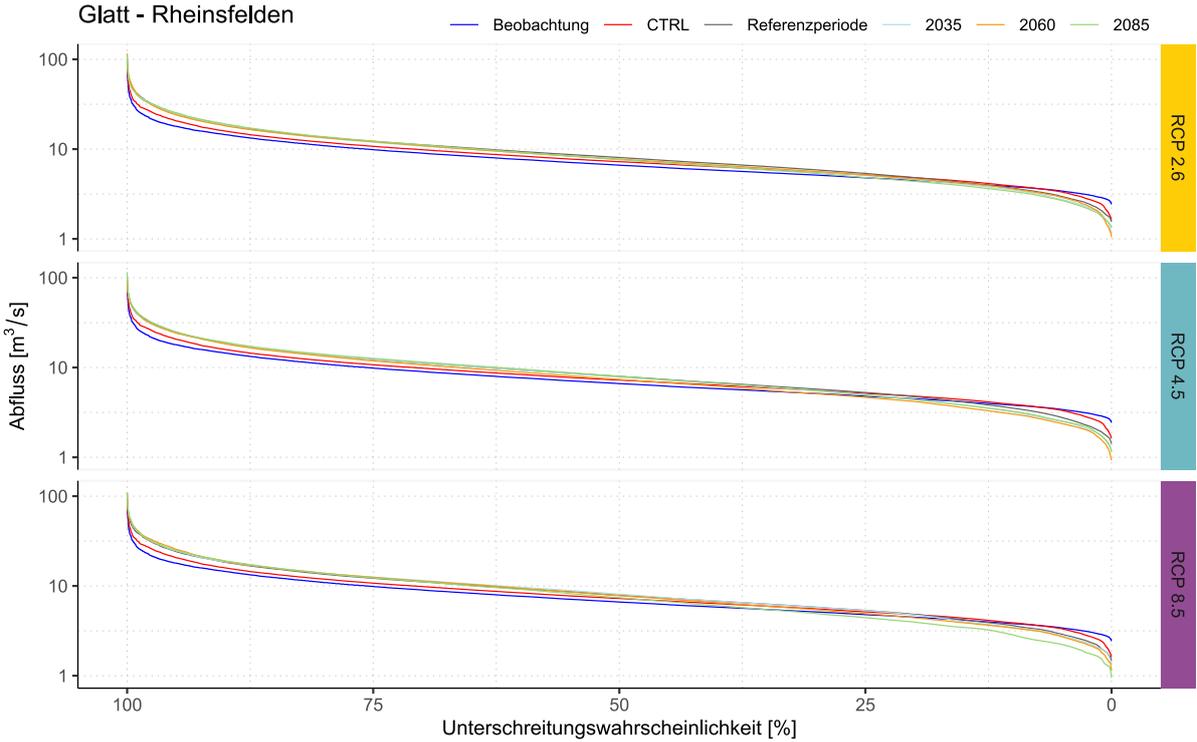


Abbildung 5.18 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Glatt in Rheinsfelden, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

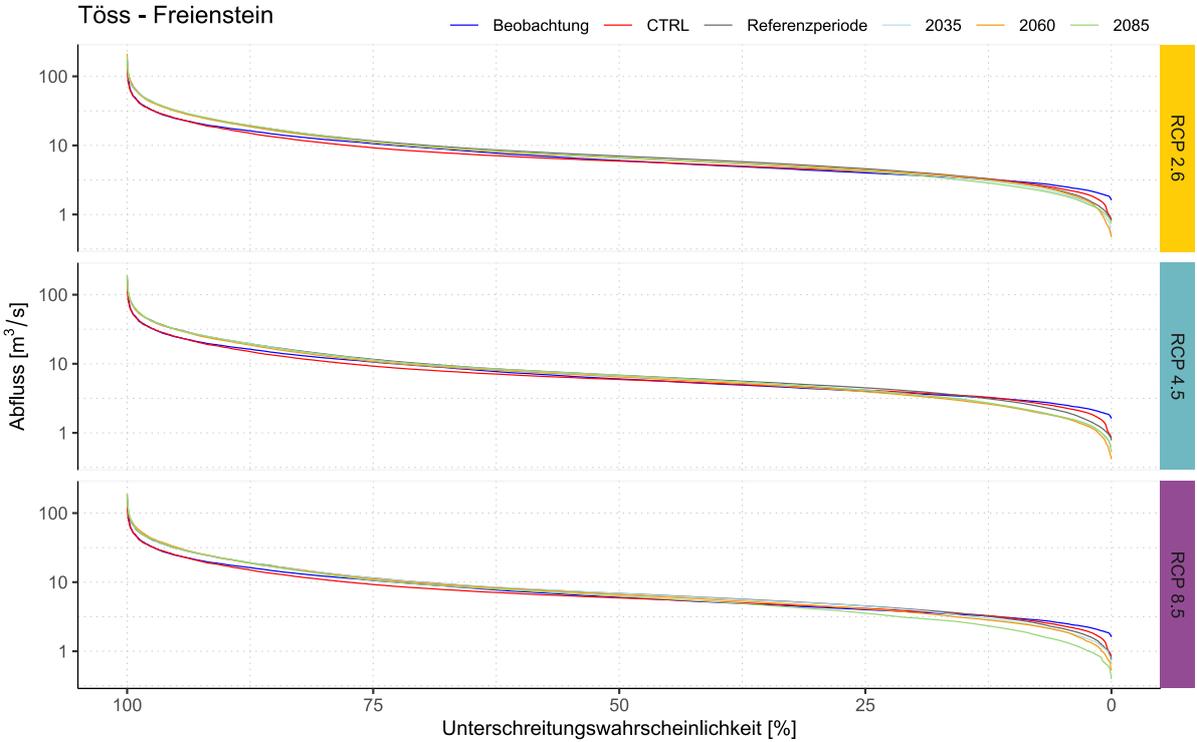


Abbildung 5.19 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Töss in Freienstein, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

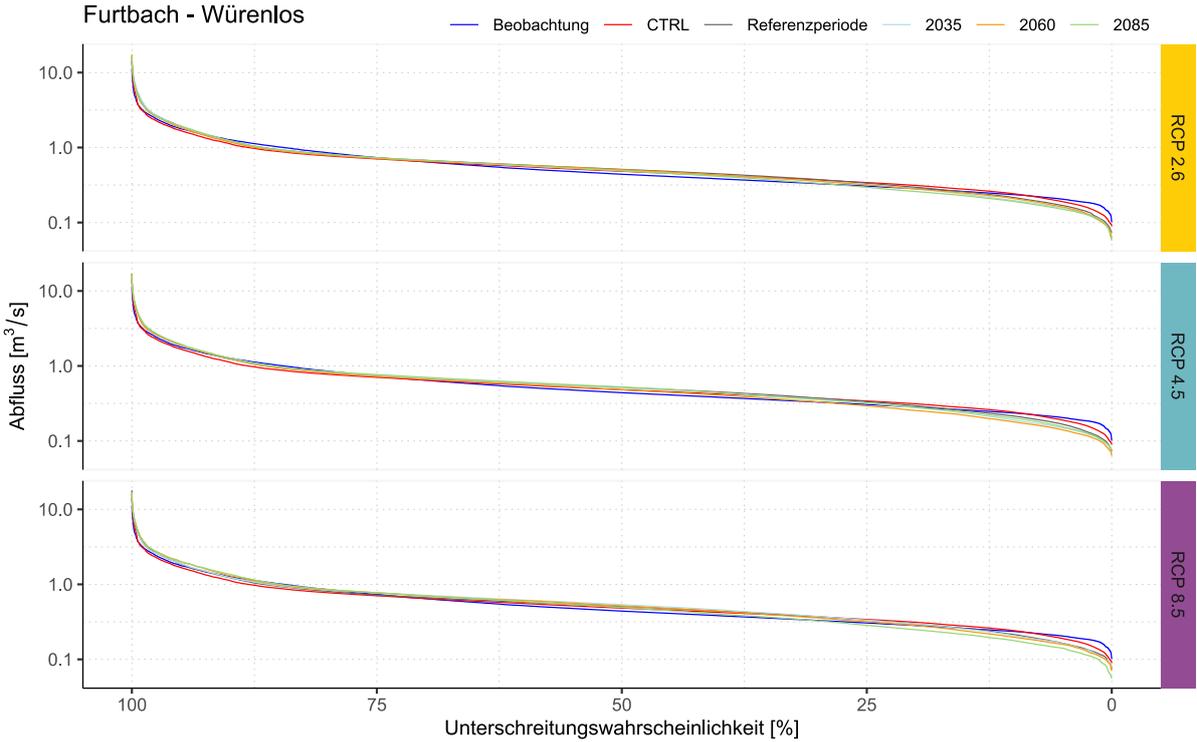


Abbildung 5.20 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) beim Furtbach in Würenlos, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

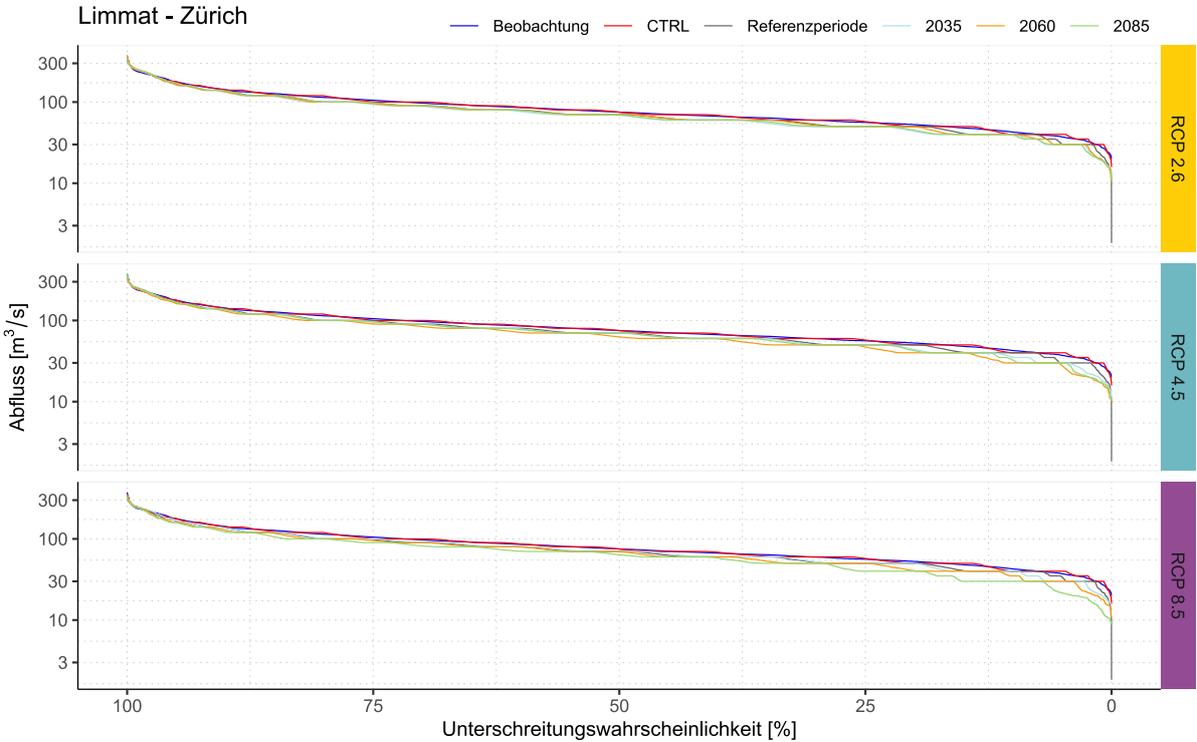


Abbildung 5.21 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Limmat in Zürich, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

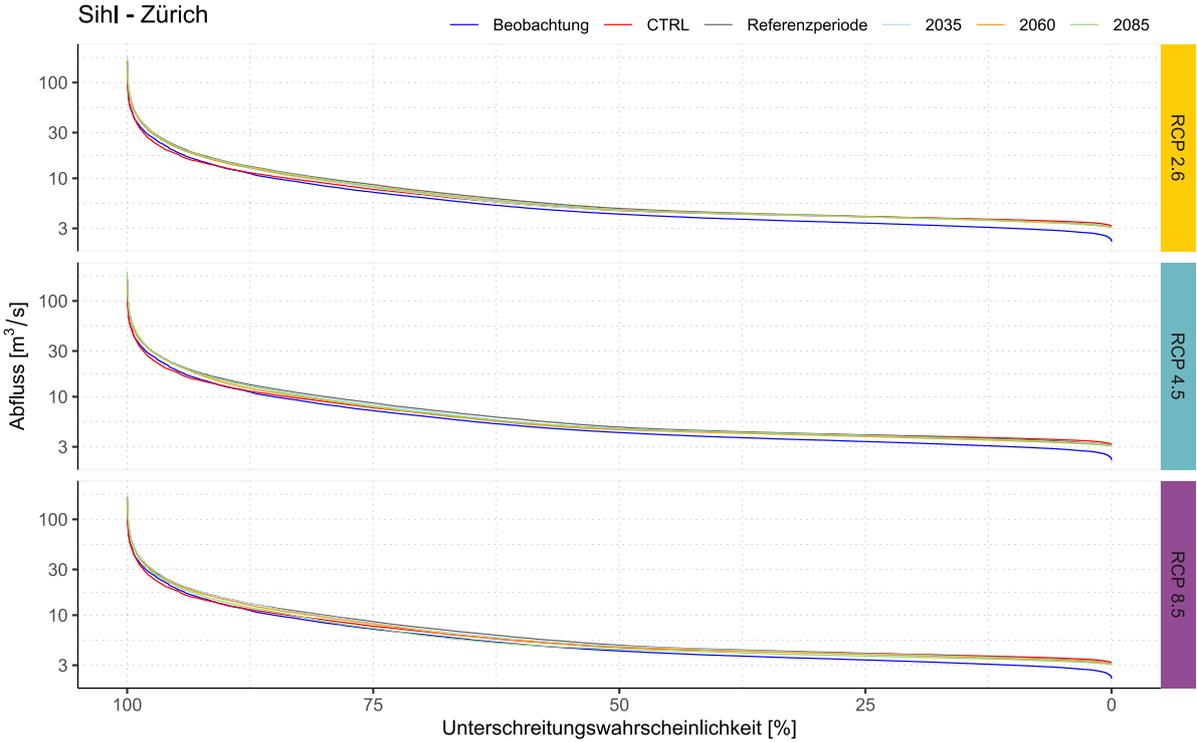


Abbildung 5.22 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Sihl in Zürich, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

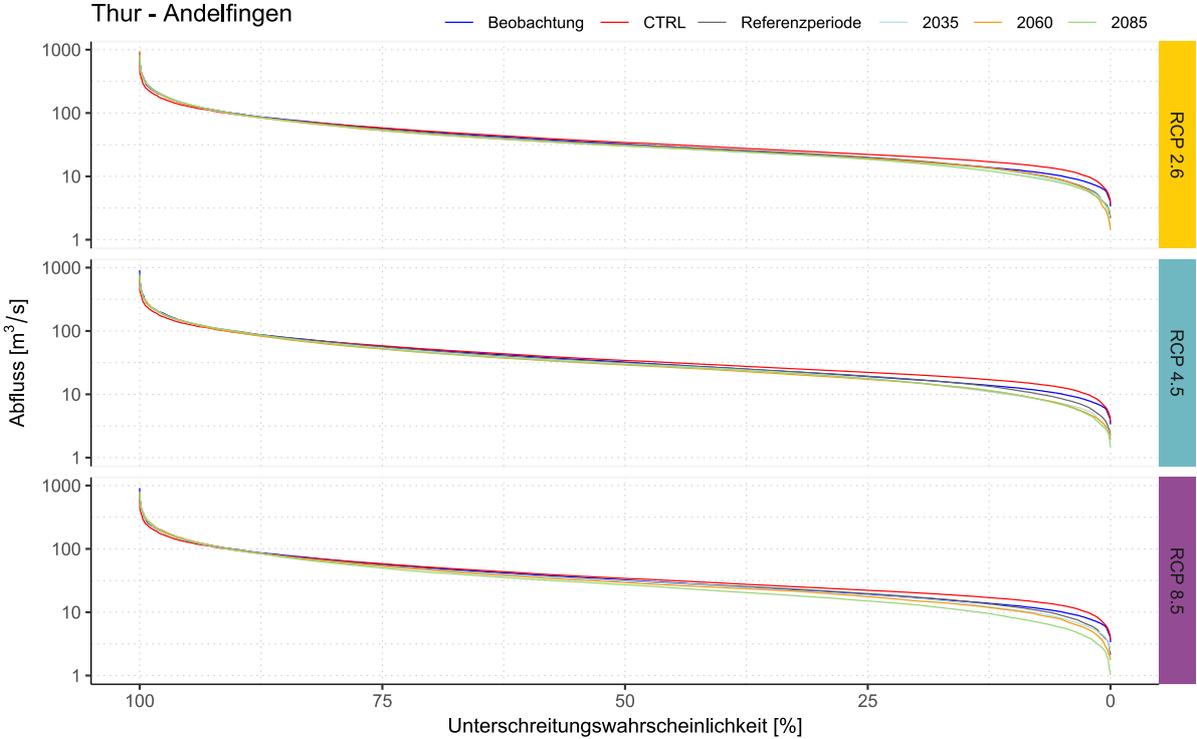


Abbildung 5.23 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Thur in Andelfingen, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

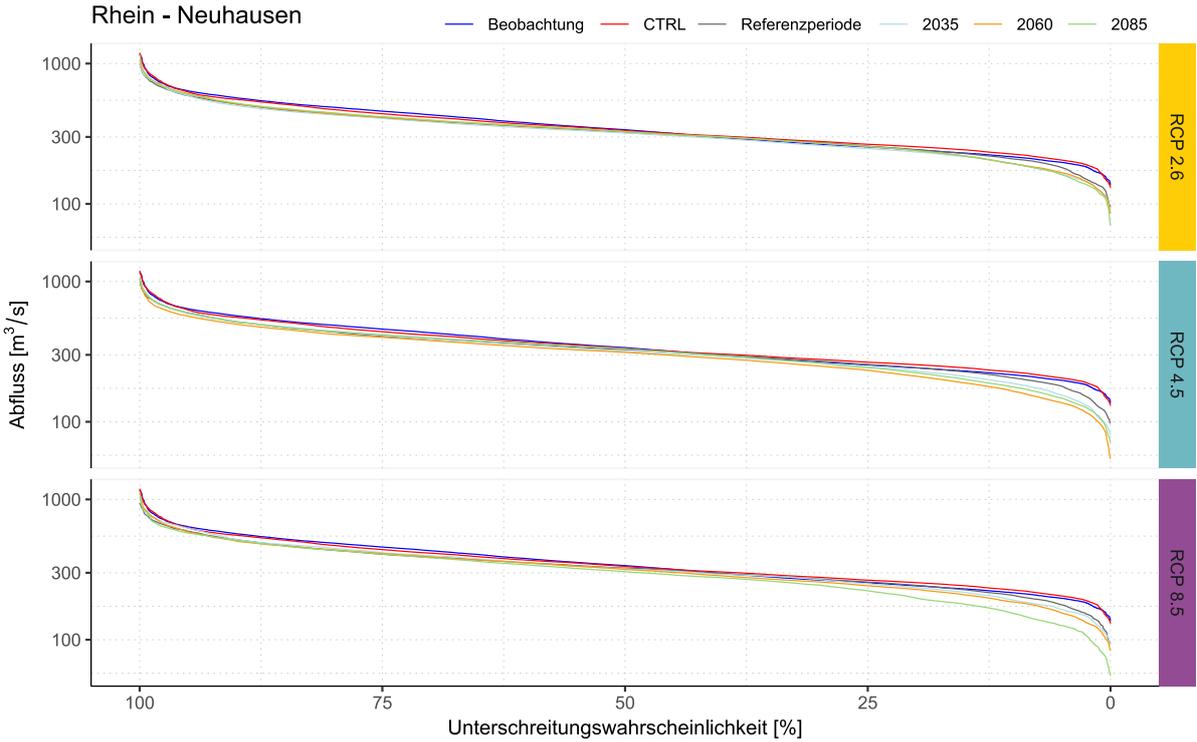


Abbildung 5.24 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) beim Rhein in Neuhausen, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

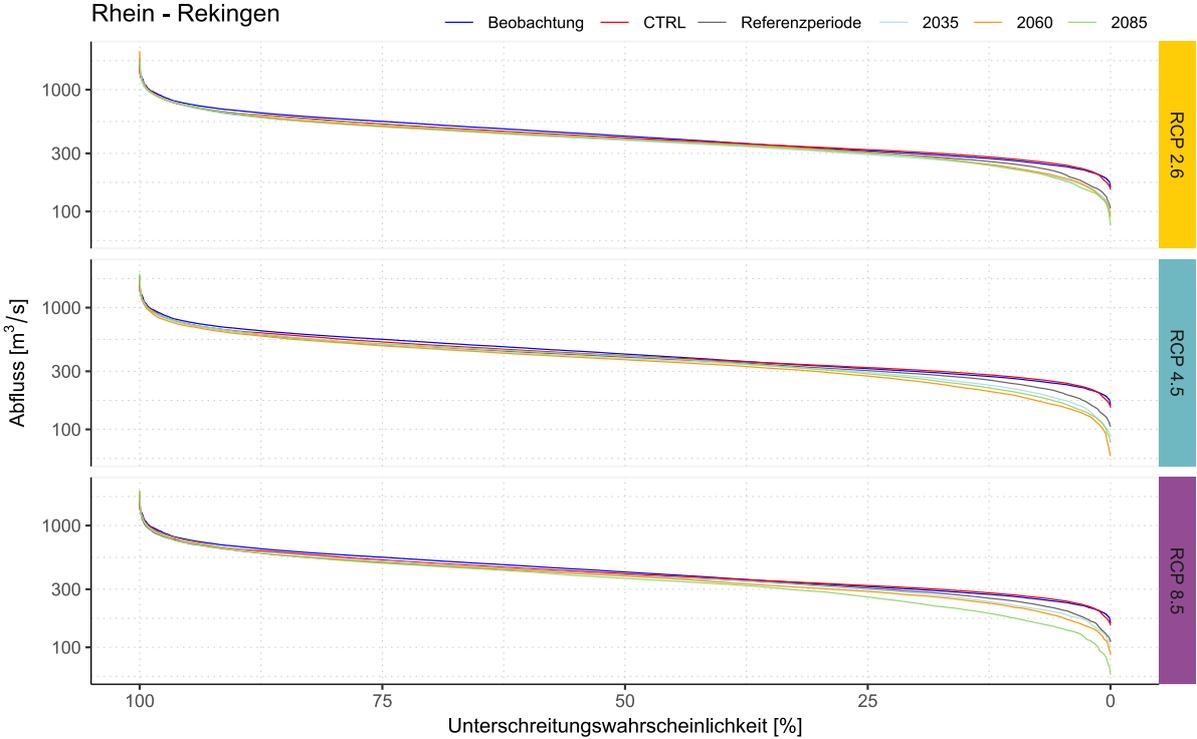


Abbildung 5.25 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) beim Rhein in Rekingen, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

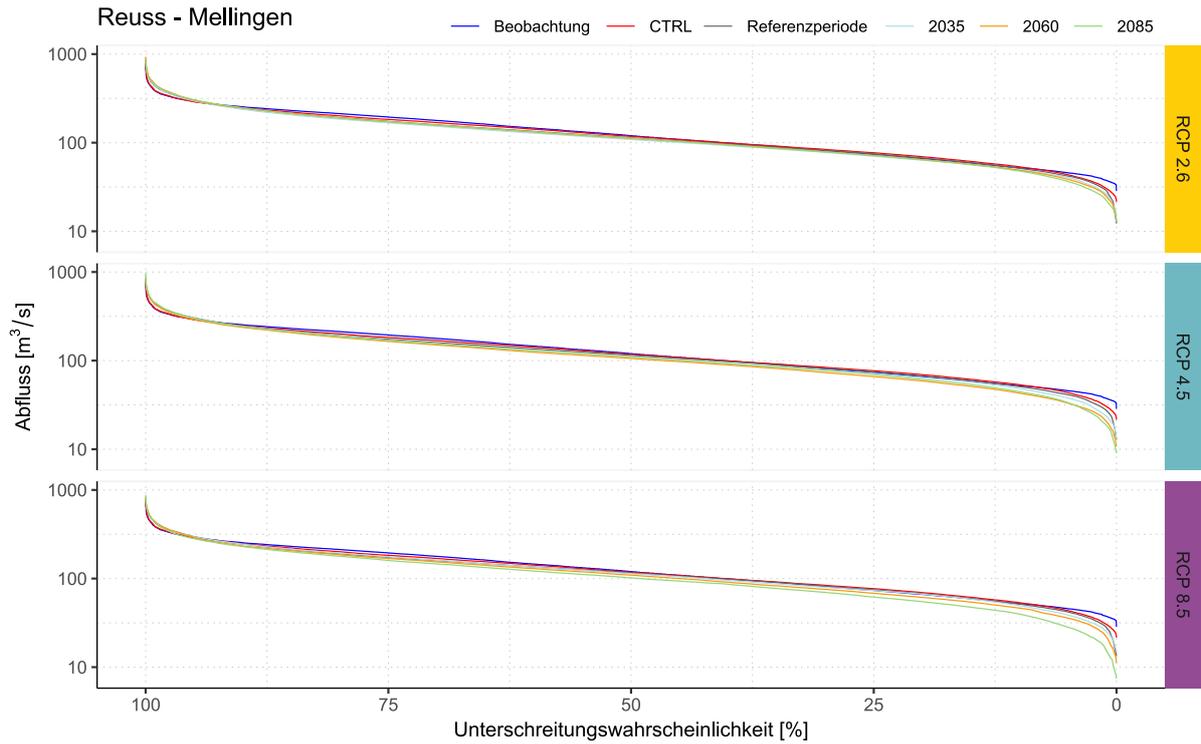


Abbildung 5.26 Beobachtete und modellierte (CTRL) Abflussdauerkurven der Referenzperiode sowie Median-Abflussdauerkurven für die CH2018 Simulationen der Referenzperiode, der nahen (2035), mittleren (2060) und fernen Zukunft (2085) bei der Reuss in Mellingen, jeweils separiert nach RCP. Da die Kurven Beobachtung, CTRL und CH2018-Referenzperiode grösstenteils nicht identisch sind (siehe auch Abschnitt 5.3), sind Trends mit grosser Vorsicht zu betrachten!

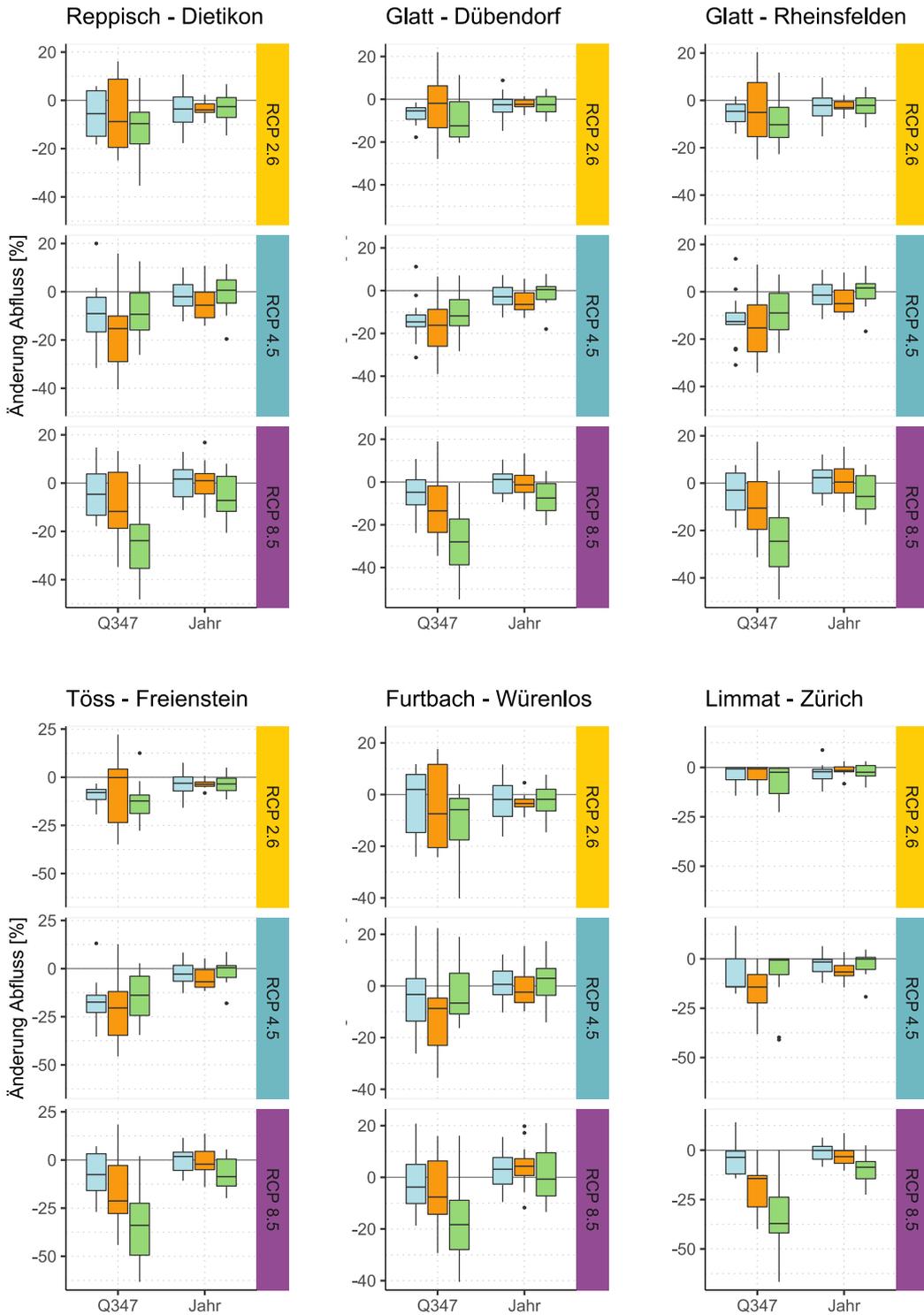


Abbildung 5.27 Relative Veränderungen der Q₃₄₇-Abflüsse und der Jahresmittelwerten der 39 Modellketten in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach RCP (2.6, 4.5, 8.5) und Zeitperiode (2035 = hellblau, 2060 = orange, 2085 = grün). Dargestellt sind die Reppisch bei Dietikon, die Glatt bei Dübendorf und Rheinsfelden, die Töss bei Freienstein, der Furtbach bei Würenlos und die Limmat bei Zürich.

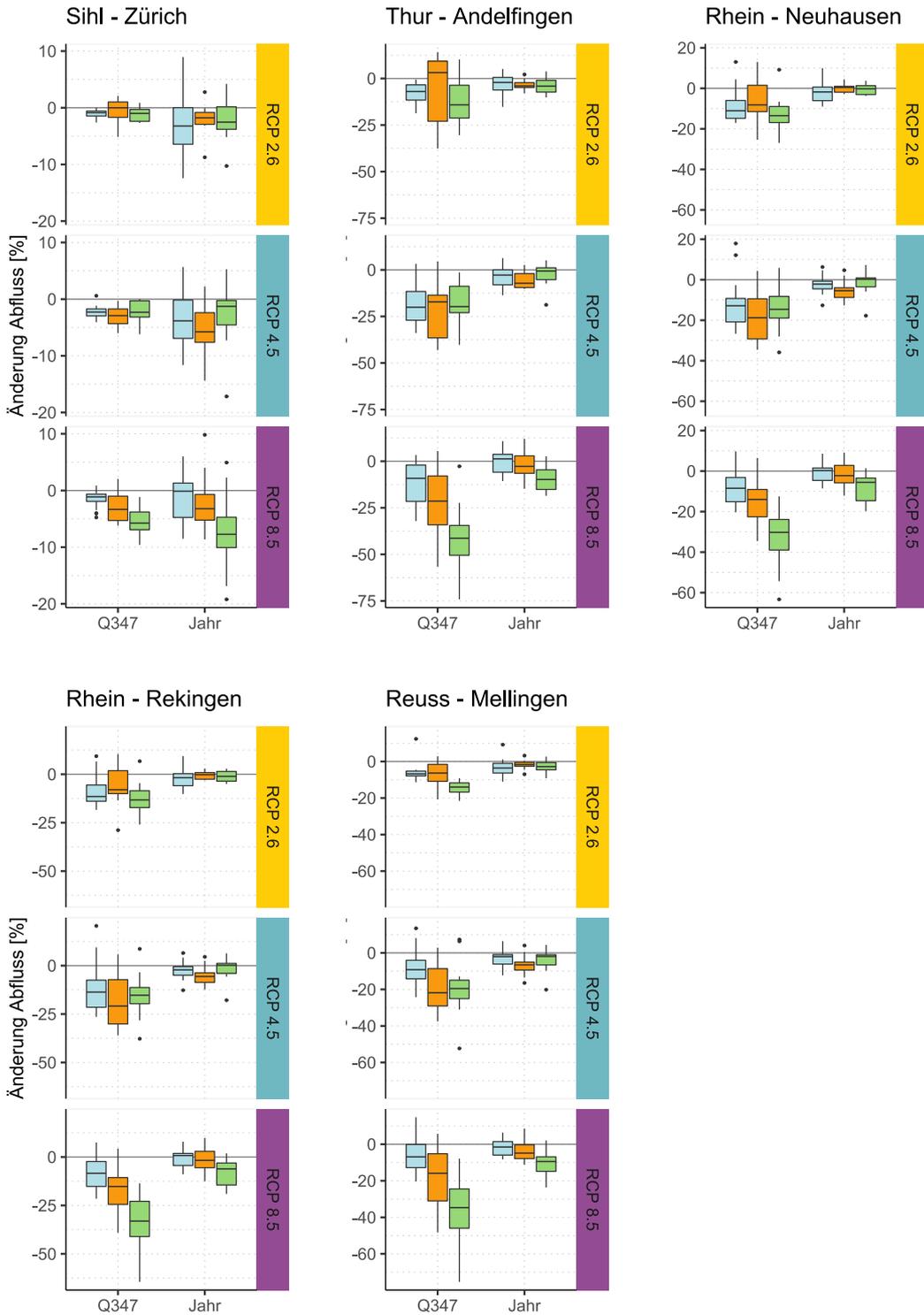


Abbildung 5.28 Relative Veränderungen der Q₃₄₇-Abflüsse und der Jahresmittelwerten der 39 Modellketten in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach RCP (2.6, 4.5, 8.5) und Zeitperiode (2035 = hellblau, 2060 = orange, 2085 = grün). Dargestellt sind die Sihl bei Zürich, die Thur bei Andelfingen, der Rhein bei Neuhausen und Rekingen und die Reuss bei Mellingen.

Tabelle 5.5 Gemessenes Q_{347} der Referenzperiode (Q_{347} gemessen), Median der relativen Veränderung in Bezug zur Referenzperiode der Q_{347} -Szenarien (Q_{347} Veränderung) sowie die Verrechnung der beiden Werte zu einem neuen möglichen zukünftigen Median- Q_{347} (Q_{347} Zukunft) für die Reppisch (Dietikon), die Glatt (Dübendorf, Rheinsfelden), die Töss (Freienstein), den Furtbach (Würenlos), die Limmat (Zürich), die Sihl (Zürich), die Thur (Andelfingen), den Rhein (Neuhausen, Rekingen) und die Reuss (Mühlau), separiert nach RCP und Zeitperiode. Die mit einem * gekennzeichneten Werte zeigen eine Übereinstimmung der Vorzeichen der Modellketten von mindestens 75 %. Bei den mit ** gekennzeichneten Werten ist das Vorzeichen für alle Modellketten (100 %) gleich. Q_{347} Veränderung und Q_{347} Zukunft sollten mit äusserster Vorsicht verwendet werden, da die komplette Klimaunsicherheit der verschiedenen Modellketten nicht berücksichtigt wurde!

Fliessgewässer, Ort	RCP	Periode	Q_{347} gemessen [m ³ /s]	Q_{347} Veränderung [%]	Q_{347} Zukunft [m ³ /s]
Reppisch, Dietikon	2.6	2035	0.26	-6	0.24
Reppisch, Dietikon	2.6	2060	0.26	-9	0.24
Reppisch, Dietikon	2.6	2085	0.26	-10*	0.23
Reppisch, Dietikon	4.5	2035	0.26	-9*	0.24
Reppisch, Dietikon	4.5	2060	0.26	-15*	0.22
Reppisch, Dietikon	4.5	2085	0.26	-9*	0.24
Reppisch, Dietikon	8.5	2035	0.26	-5	0.25
Reppisch, Dietikon	8.5	2060	0.26	-12	0.23
Reppisch, Dietikon	8.5	2085	0.26	-24*	0.20
Glatt, Dübendorf	2.6	2035	1.56	-5**	1.48
Glatt, Dübendorf	2.6	2060	1.56	-2	1.53
Glatt, Dübendorf	2.6	2085	1.56	-12*	1.37
Glatt, Dübendorf	4.5	2035	1.56	-15*	1.33
Glatt, Dübendorf	4.5	2060	1.56	-16*	1.31
Glatt, Dübendorf	4.5	2085	1.56	-12*	1.37
Glatt, Dübendorf	8.5	2035	1.56	-5	1.48
Glatt, Dübendorf	8.5	2060	1.56	-13*	1.36
Glatt, Dübendorf	8.5	2085	1.56	-28**	1.12
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2035	3.41	-5*	3.24
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2060	3.41	-5	3.24
Glatt, Rheinsfelden	2.6	2085	3.41	-10*	3.07
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2035	3.41	-13*	2.97
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2060	3.41	-15*	2.90
Glatt, Rheinsfelden	4.5	2085	3.41	-9*	3.10
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2035	3.41	-3	3.31
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2060	3.41	-11	3.03
Glatt, Rheinsfelden	8.5	2085	3.41	-25*	2.56
Töss, Freienstein	2.6	2035	2.49	-8**	2.29
Töss, Freienstein	2.6	2060	2.49	0	2.49
Töss, Freienstein	2.6	2085	2.49	-12*	2.19
Töss, Freienstein	4.5	2035	2.49	-17*	2.07
Töss, Freienstein	4.5	2060	2.49	-20*	1.99
Töss, Freienstein	4.5	2085	2.49	-14*	2.14
Töss, Freienstein	8.5	2035	2.49	-8	2.29
Töss, Freienstein	8.5	2060	2.49	-21*	1.97
Töss, Freienstein	8.5	2085	2.49	-34*	1.64
Furtbach, Würenlos	2.6	2035	0.20	2	0.20
Furtbach, Würenlos	2.6	2060	0.20	-7	0.19
Furtbach, Würenlos	2.6	2085	0.20	-6*	0.19
Furtbach, Würenlos	4.5	2035	0.20	-3	0.19
Furtbach, Würenlos	4.5	2060	0.20	-9*	0.18
Furtbach, Würenlos	4.5	2085	0.20	-7	0.19
Furtbach, Würenlos	8.5	2035	0.20	-4	0.19
Furtbach, Würenlos	8.5	2060	0.20	-8	0.18
Furtbach, Würenlos	8.5	2085	0.20	-18*	0.16
Limmat, Zürich	2.6	2035	38	-1	38
Limmat, Zürich	2.6	2060	38	-1	38
Limmat, Zürich	2.6	2085	38	-2*	37
Limmat, Zürich	4.5	2035	38	-14	33
Limmat, Zürich	4.5	2060	38	-14*	33
Limmat, Zürich	4.5	2085	38	-1	38
Limmat, Zürich	8.5	2035	38	-4*	36
Limmat, Zürich	8.5	2060	38	-14*	33
Limmat, Zürich	8.5	2085	38	-37*	24

Fließgewässer, Ort	RCP	Periode	Q ₃₄₇ gemessen [m ³ /s]	Q ₃₄₇ Veränderung [%]	Q ₃₄₇ Zukunft [m ³ /s]
Sihl, Zürich	2.6	2035	2.83	-1*	2.80
Sihl, Zürich	2.6	2060	2.83	0	2.83
Sihl, Zürich	2.6	2085	2.83	-1*	2.80
Sihl, Zürich	4.5	2035	2.83	-2*	2.77
Sihl, Zürich	4.5	2060	2.83	-3**	2.75
Sihl, Zürich	4.5	2085	2.83	-2*	2.77
Sihl, Zürich	8.5	2035	2.83	-1*	2.80
Sihl, Zürich	8.5	2060	2.83	-3*	2.75
Sihl, Zürich	8.5	2085	2.83	-6**	2.66
Thur, Andelfingen	2.6	2035	10	-7**	9
Thur, Andelfingen	2.6	2060	10	3	10
Thur, Andelfingen	2.6	2085	10	-14*	9
Thur, Andelfingen	4.5	2035	10	-20*	8
Thur, Andelfingen	4.5	2060	10	-17*	8
Thur, Andelfingen	4.5	2085	10	-20**	8
Thur, Andelfingen	8.5	2035	10	-9*	9
Thur, Andelfingen	8.5	2060	10	-21*	8
Thur, Andelfingen	8.5	2085	10	-41**	6
Rhein, Neuhausen	2.6	2035	197	-11*	175
Rhein, Neuhausen	2.6	2060	197	-8	181
Rhein, Neuhausen	2.6	2085	197	-13*	171
Rhein, Neuhausen	4.5	2035	197	-13*	171
Rhein, Neuhausen	4.5	2060	197	-19*	160
Rhein, Neuhausen	4.5	2085	197	-15*	167
Rhein, Neuhausen	8.5	2035	197	-8*	181
Rhein, Neuhausen	8.5	2060	197	-14*	169
Rhein, Neuhausen	8.5	2085	197	-30**	138
Rhein, Rekingen	2.6	2035	236	-11*	210
Rhein, Rekingen	2.6	2060	236	-8	217
Rhein, Rekingen	2.6	2085	236	-13*	205
Rhein, Rekingen	4.5	2035	236	-14*	203
Rhein, Rekingen	4.5	2060	236	-21*	186
Rhein, Rekingen	4.5	2085	236	-15*	201
Rhein, Rekingen	8.5	2035	236	-8*	217
Rhein, Rekingen	8.5	2060	236	-15*	201
Rhein, Rekingen	8.5	2085	236	-33**	158
Reuss, Mellingen	2.6	2035	46	-7*	43
Reuss, Mellingen	2.6	2060	46	-6*	43
Reuss, Mellingen	2.6	2085	46	-14**	40
Reuss, Mellingen	4.5	2035	46	-9*	42
Reuss, Mellingen	4.5	2060	46	-22*	36
Reuss, Mellingen	4.5	2085	46	-20*	37
Reuss, Mellingen	8.5	2035	46	-7	43
Reuss, Mellingen	8.5	2060	46	-16*	39
Reuss, Mellingen	8.5	2085	46	-35**	30

6 Diskussion Veränderungen Wasserdargebot

6.1 Mittlere Monats- und Jahresabflüsse

Abflusszenarien stellen eine Funktion der Inputwerte (Klimaszenarien) dar. Die Klimaszenarien (CH2018, 2018) widerspiegeln deshalb die wichtigsten vorherrschenden Prozesse in den Einzugsgebieten. Bei den eher kleinen, kantonalen Einzugsgebieten Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Sihl und Thur ist ein ähnlicher Trend sichtbar. Die Abflusszunahme im Januar, gefolgt von einer sich lokal unterscheidenden Phase zwischen Februar und Juni und eine Abflussabnahme von Juli bis September. Bei diesen Einzugsgebieten sind, wegen den pluvialen Abflussregimen (Niederschlag in Form von Regen ist der dominante Faktor für die Abflussbildung; Weingartner and Aschwanden, 1992), die Veränderungen hauptsächlich auf den Niederschlagsinput aus den CH2018 Daten zurückzuführen. Als Beispiel sei hier die Veränderung des mittleren Monats- und Jahresniederschlags im Vergleich zur Referenzperiode der Glatt bei Rheinsfelden aufgeführt (Abbildung 6.1). Der Trend der Veränderungen ist nahezu identisch zu den Trends der Abflusszenarien: eine Niederschlagszunahme im Januar, eine etwas unklare Phase im Frühling, gefolgt von einer Niederschlagsabnahme im Sommer. Der Grund für die Abflussabnahme im März unter RCP 2.6 ist ebenfalls auf eine Veränderung des Niederschlagsinputs (eine Abnahme) zurückzuführen. Allerdings können andere meteorologische Inputs wie z.B. die Temperatur und die Globalstrahlung (die dann die Schneeschmelze und die Evapotranspiration beeinflussen) diese Trends noch verstärken. Dies wurde z.B. für die Thur bereits im CH2018 Bericht (CH2018, 2018) und im Hydro-CH2018 Bericht (BAFU, 2021) aufgezeigt.

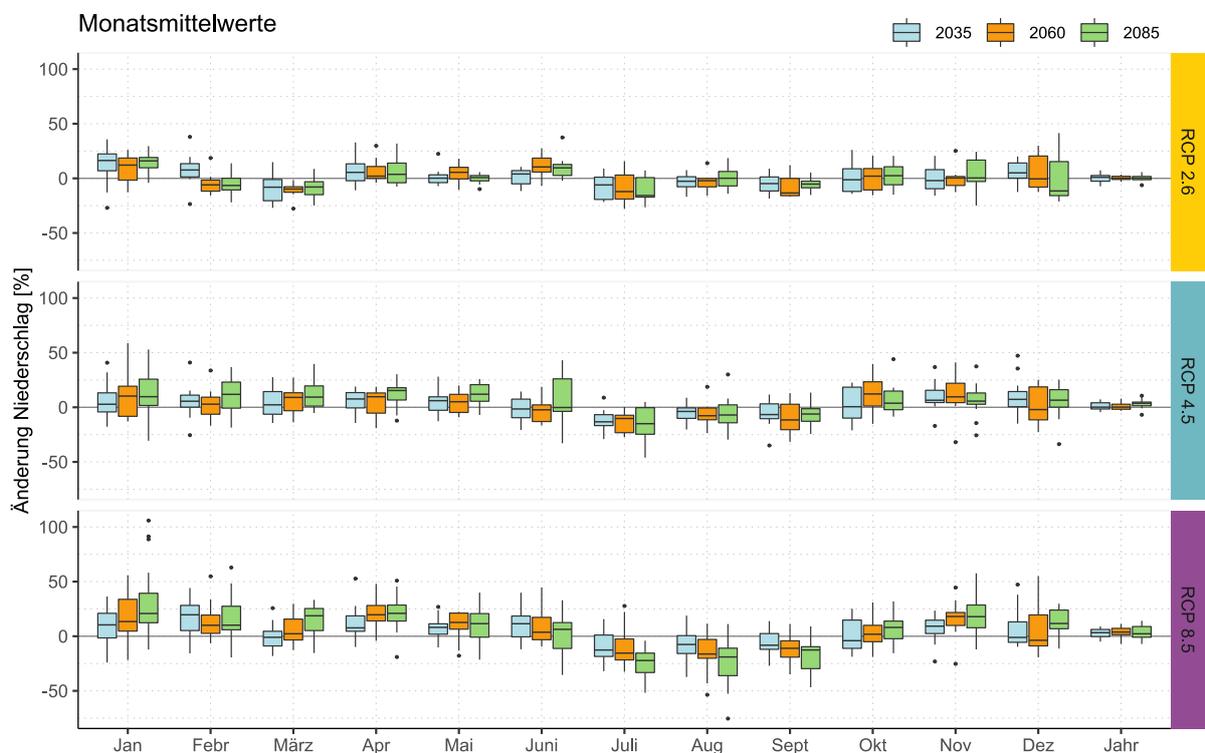


Abbildung 6.1 Niederschlagsszenarien (CH2018 Daten) für die Glatt bei Rheinsfelden. Dargestellt sind die relativen Veränderungen (%) der Monats- und Jahresmittelwerte der 39 Modellketten in Bezug auf die Referenzperiode, separiert nach Zeitperiode und RCP.

Die Sihl ist im oberen Teil des Einzugsgebietes bis Biberbrugg nival (Niederschlag in Form von Schnee ist der dominante Faktor der Abflussbildung) und im unteren Teil des Einzugsgebiets sowie bei der Alp und Biber nivo-pluvial (eine Mischung zwischen Schnee und Regen) geprägt (Weingartner and Aschwanden, 1992). Zudem ist der Abfluss der Sihl stark von der Wasserkraftnutzung (Etzelwerk: ein Pumpspeicherkraftwerk der SBB) abhängig. Dies führt zu den leicht anderen Abflussveränderungen bei der Sihl im Frühling (im Vergleich zu Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Thur): die künftige Abflussabnahme im April und Mai wegen fehlender Schneeschmelze.

Die Grosseinzugsgebiete Limmat, Rhein und Reuss sind in ihren Kopfeinzugsgebieten vor allem nivo-glacial (Schnee- und Gletscherdominiert) geprägt (Weingartner and Aschwanden, 1992) und verhalten sich deshalb bei den künftigen Abflussveränderungen sehr ähnlich. Die Abflusszunahmen im Winter und Frühling sind auf die höheren Temperaturen und die dadurch bedingte Schneeschmelze zurückzuführen. Die Abflussabnahme im Sommer (Juli bis Oktober) zeigt einerseits die Niederschlagsabnahme und, vor allem gegen Ende des Jahrhunderts, das Defizit der Gletscherschmelze (Ayala *et al.*, 2020).

Generell haben die Abflussszenarien gezeigt, dass saisonal bei den kleinen mittelländischen Einzugsgebieten lokal diverse kleine Unterschiede der mittleren Abflussveränderungen vorliegen. Bei den Grosseinzugsgebieten sind diese robuster und eindeutiger. Zwischen Neuhausen und Rekingen fliessen die Thur, Töss und Glatt in den Rhein. Dies sieht man auch bei den künftigen Veränderungen. In Neuhausen waren die Trends im März und Mai eindeutig. In Rekingen werden sie weniger deutlich, genau wie dies in den kleineren Einzugsgebieten der Fall ist.

Bei allen betrachteten Einzugsgebieten wird das Wasser künftig eher saisonal umverteilt und über das Jahr gesehen verändert sich nicht viel. Im Winter gibt es bei allen Einzugsgebieten eine Abflusszunahme, im Sommer eine Abflussabnahme. Dies deckt sich mit den zu erwartenden Veränderungen des Niederschlags in der Nordostschweiz bis Ende Jahrhundert: weniger Niederschlag im Sommer (Bosshard *et al.*, 2011; CH2018, 2018; BAFU, 2021), mehr im Winter und Frühling, wobei der Herbst eher gleich bleibt (CH2018, 2018). Auf eine potentielle Wasserknappheit für die Nordschweiz im Sommer wurde auch bereits von Bosshard *et al.* (2011), Brunner *et al.* (2019) und dem Hydro-CH2018 Projekt (BAFU, 2021) hingewiesen. Die WSL sieht deshalb vor allem für das Sommerdefizit im Kanton Zürich Handlungsbedarf. Mögliche Adaptionen könnten sein: eine verbesserte Effizienz bei der Bewässerung in der Landwirtschaft (Tröpfchenbewässerung), der Wechsel auf trockenresistente Anbauprodukte und oder der Bau von Infrastrukturen um Wasser zu speichern (BAFU, 2021).

«Aus Sicht der Gewässer ist es [jedoch] eindeutig: Klimaschutz ist keine Option, sondern eine Notwendigkeit! Nur mit Klimaschutz können weitreichende Veränderungen verhindert und die Kosten für die Anpassung begrenzt werden.» (BAFU, 2021)

6.2 Median der 50 % Perzentil-Abflüsse (Medianabflüsse)

Bei den Medianabflüssen der Limmat, des Rheins und der Reuss ist damit zu rechnen, dass sich das Abflussminimum bis Ende Jahrhundert vom Winter in den Spätsommer/Herbst verschiebt; bei der Limmat unter allen RCPs, beim Rhein in Neuhausen und der Reuss unter RCP 8.5 und beim Rhein in Rekingen unter RCP 4.5 und 8.5. Unter den übrigen RCPs werden die Medianabflüsse im Winter und Spätsommer/Herbst ähnlich hoch sein. Dies hat direkte Folgen für die Landwirtschaft, Kraftwerksbetreiber etc. (siehe auch Brunner *et al.*, 2019).

6.3 Median der 10 % Perzentil-Abflüsse & Q₃₄₇

Die Niedrigwasseranalysen sind, wegen der Art und Weise wie die Modelle kalibriert wurden (auf Wasservolumen und nicht für Niedrigwasseranalysen; siehe Abschnitt 4.3) und wegen der grossen Unsicherheiten der CH2018 Daten und des hydrologischen Modells, mit äusserster Vorsicht

zu betrachten. Nichtsdestotrotz sind eindeutige Tendenzen ersichtlich. Die tiefen Abflüsse (q10) werden bis Ende Jahrhundert generell eher noch tiefer und dies vor allem dann, wenn die Abflüsse bereits heute tief sind: im Sommer/Herbst. Dasselbe zeigt sich bei Q₃₄₇: die Abflüsse werden bis Ende Jahrhundert eher tiefer ausfallen. Der Trend ist in allen Einzugsgebieten eindeutig, ausser bei der Sihl. Generell haben tiefe Abflüsse negative Auswirkungen auf die Ökosysteme. Mit künftig noch tieferen Abflüssen könnte sich die Situation weiter verschlechtern (Benateau *et al.*, 2019; BAFU, 2021).

Die Sihl ist durch das Elektrizitätskraftwerk beim Sihlsee stark reguliert und meist wird nur das Restwasser unterhalb der Staumauer abgegeben. Die Restwassermenge ist so definiert, dass der Abfluss der Sihl in Dreiwässern (nach dem Zusammenfluss von Alp, Biber und Sihl) mindestens 2.3 m³/s betragen muss. Da eine Veränderung der Restwassermengenabgabe für die Zukunft im Routingmodell der Sihl nicht eingebaut wurde, sind Abflussveränderungen der Sihl bei Zürich hauptsächlich vom Eintrag von Alp und Biber und vom Gebietsabfluss zwischen dem Sihlsee und Zürich abhängig. Die Alp und Biber liefern im Durchschnitt rund die Hälfte des Wassers der Sihl bei Zürich, bei Niedrigwasser überwiegt der Restwasseranteil der Sihl. Damit die Restwassermenge der Sihl jederzeit gewährleistet werden kann und sich der Wasserstand des Sihlsees im Sommer jederzeit über der Mückengrenze befindet, kann bei Bedarf Wasser aus dem Zürichsee in den Sihlsee gepumpt werden. Während Trockenheitsereignissen (wie z.B. in den Sommern 2003, 2015 und 2018) kann so die Restwassermengenabgabe gewährleistet werden. Abnahmen bei Q₃₄₇ sind deshalb ausschliesslich von einem verminderten Gebietszufluss zwischen Dreiwässern und Zürich sowie den Zuflüssen von Alp und Biber abhängig. Eine Niedrigwasseranalyse bei der Sihl unter verminderten Restwasserabgaben beim Sihlsee würde tiefer ausfallen.

6.4 Median der 90 % Perzentil-Abflüsse

Bei den Medianen der q90 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 q90 Abfluss nahe des q50 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.

7 Schlussfolgerungen

Die verwendeten Modelle (PREVAH in Kombination mit Routing Modellen) waren in der Lage die Abflüsse der Referenzperiode gut zu simulieren. Die neuen Routing Modelle für die Reppisch, die Glatt, die Töss, den Furtbach und die Limmat verbesserten die Ergebnisse eindeutig.

Als robustere Betrachtung der zukünftigen mittleren Abflüsse wurden die relativen Veränderungen der Zukunftsperioden (2035, 2060, 2085) zur Referenzperiode verwendet. So waren beim Abfluss Aussagen zu den prozentualen Zu- oder Abnahmen möglich. Bei den Wasserständen wurde die absolute Veränderung in cm angegeben. Für den Auftraggeber wurden diese Veränderungen weiter mit den gemessenen Abflussmittelwerten/Wasserständen der Referenzperiode verrechnet, um die zukünftigen absoluten Mediane der Abflussmittelwerte/Wasserstände zu erhalten. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass beim Betrachten jeglicher Medianwerte in den Tabellen dieser Studie die Unsicherheiten nicht vergessen gehen dürfen!

Abflusszenarien sind eine Funktion des Inputs. Die beschriebenen Veränderungen sind in den kleinen, kantonalen Einzugsgebieten vor allem auf Veränderungen des Niederschlags zurückzuführen.

Generell werden in Zukunft im Winter höhere und im Sommer tiefere Abflüsse zu erwarten sein. In den kleineren, eher kantonalen Einzugsgebieten (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Sihl, Thur) ist eine Zunahme der mittleren Abflüsse im Januar eindeutig (für alle RCPs und Zeitperioden). Die grösste Zunahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 bei der Thur mit +35 % zu erwarten. Eine Abnahme der mittleren Abflüsse von Juli bis September ist ebenfalls eindeutig (für alle RCPs und Zeitperioden). Die stärkste Abnahme ist Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 im September bei der Thur mit -44 % zu erwarten. Bei den Jahresmittelwerten ist keine eindeutige Veränderung zu erkennen. Es werden also vor allem saisonale Veränderungen (Wasserumverteilungen innerhalb des Jahres) stattfinden. Allenfalls kann jedoch mit einer leichten Abflussabnahme gerechnet werden. Bei der Sihl ist mit einer leichten Abflussreduktion bei den Jahresmittelwerten zu rechnen (Ende Jahrhundert, RCP 8.5: -8 %).

Bei den Grosseinzugsgebieten Limmat, Rhein und Reuss ist unter allen RCPs und Zeitperioden mit einer eindeutigen Zunahme der mittleren Abflüsse im Januar und Februar zu rechnen sowie mit einer eindeutigen Abnahme der mittleren Abflüsse von Juli bis Oktober. Bei der Limmat und der Reuss werden die mittleren Abflüsse ausserdem auch im Dezember eindeutig tiefer ausfallen. Die stärkste Abflusszunahme ist bei der Reuss im Januar Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 mit +55 %. Die stärkste Abflussabnahme ist ebenfalls bei der Reuss zu erwarten (Ende Jahrhundert, RCP 8.5, August: -51 %). Bei den Jahresmittelwerten ist bei der Limmat und der Reuss eine eindeutige Tendenz zur Abnahme zu erwarten (Ende Jahrhundert, RCP 8.5: -9 %).

Die mittleren Seewasserstände verändern sich beim Greifensee von +6 cm bis zu -14 cm (je nach RCP und Zeitperiode unterschiedlich stark). Beim Zürichsee verändern sich diese zwischen +5cm und -5cm (je nach RCP und Zeitperiode unterschiedlich stark).

Bei Q_{347} ist für alle Einzugsgebiete bis Ende Jahrhundert und unter allen RCPs eher mit einer Abnahme zu rechnen. Am stärksten ist der Rückgang bei der Thur Ende Jahrhundert unter RCP 8.5 mit -41 %. Im Winter steigen die tiefen Abflüsse (q_{10}) an, im Sommer/Herbst werden sie tiefer. Bei den hohen Abflüssen (q_{90}) ist vor allem im Sommer/Herbst mit einer Abnahme zu rechnen sowie mit einer Zunahme im Winter.

Literatur

- Akademien der Wissenschaft Schweiz. 2016. Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Bern. Available at: https://naturwissenschaften.ch/organisations/proclim/activities/reports_factsheets/81637-brennpunkt-klima-schweiz
- 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. DOI: 10.3929/ethz-b-000398099
- BAFU. 2021. Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. *Umwelt-Wissen Nr. 2101*: 140 DOI: www.bafu.admin.ch/uw-2101-d
- Benateau S, Gaudard A, Stamm C, Altermatt F. 2019. Climate change and freshwater ecosystems: impacts on water quality and ecological status. Zürich. DOI: <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/169641/>
- Bernhard L, Zappa M. 2012. Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH- CH-Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete. Birmensdorf.
- Bernhard L, Pflugshaupt C, Kotlarski S, Zappa M. 2013. Auswirkungen der CH2011 Klimaszenarien auf die Wasserressourcen - eine Abschätzung für die Schweiz. In *Wasserressourcen Im Globalen Wandel. Hydrologische Grundlagen - von Der Messung Zur Anwendung*, Weingartner R, , Schädler B (eds). Hydrologische Wissenschaften; 93–102.
- Bosshard T, Kotlarski S, Ewen T, Schär C. 2011. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences* **15** (9): 2777–2788 DOI: 10.5194/hess-15-2777-2011
- Brunner MI, Björnson 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. *Science of The Total Environment* **666**: 1033–1047 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169
- Brunner MI, Melsen LA, Newman AJ, Wood AW, Clark MP. 2020. Future streamflow regime changes in the United States: assessment using functional classification. *Hydrology and Earth System Sciences* **24** (8): 3951–3966 DOI: 10.5194/hess-24-3951-2020
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. 2019. GeoCover - Vektordaten Available at: https://map.geo.admin.ch/?topic=geol&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.geologie-geocover&layers_opacity=0.75 [Accessed 10 September 2020]
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. 2020. Map Geo Admin Available at: <https://map.geo.admin.ch/?topic=gewiss&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte->
-

- farbe [Accessed 19 May 2020]
- CH2018. 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich.
- DHI. 2004. River Network Editor. In *MIKE 11 - River Modelling Unlimited*DHI.
- GEOSTAT. 2014. Geländedaten: Geodaten DOI: 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 Resources Research* **43** (6) DOI: 10.1029/2006WR004868
- Gurtz J, Baltensweiler A, Lang H. 1999. Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes* **13** (17): 2751–2768 DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19991215)13:17<2751::AID-HYP897>3.0.CO;2-O
- Gutenson JL, Tavakoly AA, Wahl MD, Follum ML. 2020. Comparison of generalized non-data-driven lake and reservoir routing models for global-scale hydrologic forecasting of reservoir outflow at diurnal time steps. *Hydrology and Earth System Sciences* **24** (5): 2711–2729 DOI: 10.5194/hess-24-2711-2020
- Huss M, Hock R. 2015. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science* **3** (54): 22 DOI: 10.3389/feart.2015.00054
- 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.)]. Geneva, Switzerland. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, et al. 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* **14** (2): 563–578 DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2
- Köplin N, Viviroli D, Schädler B, Weingartner R. 2010. How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – a framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences* **27**: 111–119 DOI: 10.5194/adgeo-27-111-2010
- Margreth M, Kaderli R. 2021. Untersuchung der Hydrologie an der Töss und an der Eulach. SoilCom.
- Michel A, Brauchli T, Lehning M, Schaepli B, Huwald H. 2020. Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrology and Earth System Sciences* **24** (1): 115–142 DOI: 10.5194/hess-24-115-2020
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463** (7282): 747–756 DOI: 10.1038/nature08823

- Nash JE, Sutcliffe J V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10** (3): 282–290 DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- NCCS. 2019. Was sind Emissionsszenarien? Available at: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/grundlagen-zum-klima/was-sind-emissionsszenarien-.html> [Accessed 18 May 2020]
- RGI Consortium. 2017. Randolph Glacier Inventory –A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA. DOI: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>
- Rössler O, Kotlarski S, Fischer AM, Keller D, Liniger M, Weingartner R. 2019. Evaluating the added value of the new Swiss climate scenarios for hydrology: An example from the Thur catchment. *Climate Services* **13**: 1–13 DOI: 10.1016/j.cliser.2019.01.001
- Schattan P, Zappa M, Lischke H, Bernhard L, Thürig E. 2013. An approach for transient consideration of forest change in hydrological impact studies. In *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*, Boegh E, , Blyth E, , Hannah DM, , Hisdal H, , Kunstmann H, , Su B, , Yilmaz KK (eds). IAHS press: Wallingford; 311–319.
- Speich MJR, Bernhard L, Teuling AJ, Zappa M. 2015. Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. *Journal of Hydrology* **523**: 804–821 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086
- Viviroli D. 2007. Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für ungemessene Einzugsgebiete der Schweiz - Phd Thesis. Universität Bern. DOI: ISBN 978-3-905835-00-7
- Viviroli D, 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. *Journal of Hydrology* **377** (1–2): 208–225 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.022
- Viviroli D, Zappa M, Gurtz J, Weingartner R. 2009b. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software* **24** (10): 1209–1222 DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001
- Viviroli D, Zappa M, Schwanbeck J, Gurtz J, Weingartner R. 2009c. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology* **377** (1–2): 191–207 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.023
- Weingartner R, Aschwanden H. 1992. Tafel 5.2 - Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In *Hydrologischer Atlas Der Schweiz*, BAFU B für U (ed.). Bundesamt für Landestopographie swisstopo: Bern. Available at: <https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/fliessgewasser-und-seen/tafel-5->

- Yapo PO, Gupta HV, Sorooshian S. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* **181** (1–4): 23–48 DOI: 10.1016/0022-1694(95)02918-4
- 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; 19–27.
- Zappa M, Jaun S, Badoux A, Schwanbeck J, Addor N, Liechti K, Roeser I, Walser A, Viviroli D, Vogt S, et al. 2010. IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. *Wasser, Energie, Luft* **102** (3): 238–248 Available at: <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A7145/> [Accessed 28 August 2020]
- 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** (4): 1125–1146 DOI: 10.5194/tc-13-1125-2019