

Peter Kienzler, Norina Andres, Daniel Näf-Huber und Massimiliano Zappa

Herleitung extremer Niederschläge und Hochwasser im Einzugsgebiet des Sihlsees für einen verbesserten Hochwasserschutz der Stadt Zürich

Derivation of extreme precipitation and flooding in the catchment of Lake Sihl to improve flood protection in the city of Zurich

Bei einer Überflutung der Stadt Zürich durch die Sihl sind Kosten durch Hochwasserschäden in Höhe von Milliarden Euro zu erwarten. Deshalb soll der Stauraum des Sihlsees durch ein neues Wehrrglement besser für den Hochwasserschutz genutzt werden. Grundlage für das Wehrrglement sind Ganglinien extremer Hochwasser (HQ_{1000} und Probable Maximum Flood, PMF), die in der vorliegenden Studie überarbeitet wurden.

In einem ersten Schritt wurden Niederschlagsmengen mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren (P_{1000}) und der maximal mögliche Niederschlag (Probable Maximum Precipitation, PMP) erarbeitet. Ganglinien extremer Hochwasser (HQ_{1000} und PMF) wurden anschließend mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell für verschiedene Niederschlagsszenarien und Vorfeuchtebedingungen mit dem P_{1000} und dem PMP simuliert.

Die berechneten Ganglinien zeigen Abflussspitzen von bis zu 520–585 m³/s (HQ_{1000}) bzw. 900–975 m³/s (PMF) und Abflussvolumen von bis zu 22–25 Mio. m³ bzw. 40–43 Mio. m³. Es hat sich gezeigt, dass Berechnungen mit verschiedenen Niederschlagsszenarien wichtig sind, um getrennte Szenarien für die Abflussspitze und für das Abflussvolumen festlegen zu können. Die Anwendung verschiedener, v.a. physikalisch basierter Methoden und umfangreiche Plausibilitätsprüfungen der Niederschlags- und Abflusswerte waren hilfreich, um die Ergebnisse einzuordnen und plausible und robuste Grenzwerte zu erarbeiten.

Schlagwörter: Extreme Hochwasser, extreme Niederschläge, Niederschlag-Abfluss-Modellierung, Probable Maximum Flood, PMF, Probable Maximum Precipitation, PMP

A flooding of the city of Zurich by the Sihl river might cause financial damage amounting to billions of Euros. Therefore, better use should be made of the storage capacity of the artificial Lake Sihl by implementing a new regulation scheme for improved flood protection. Some constraints for the regulation scheme concern the safety of the dam in case of extreme flood hydrographs (HQ_{1000} and Probable Maximum Flood, PMF), which have been revised in the present study.

In a first step, precipitation amounts with a return period of 1,000 years (P_{1000}) and the Probable Maximum Precipitation (PMP) have been acquired. Extreme flood hydrographs (HQ_{1000} and PMF) have then been simulated using a rainfall-runoff model for different rainfall scenarios and different antecedent moisture conditions by means of P_{1000} and PMP.

The calculated hydrographs show possible peak runoff of up to 520–585 m³/s (HQ_{1000}) and 900 to 975 m³/s (PMF) and runoff volumes of up to 22–25 million m³ and 40–43 million m³. It has been found that calculations with different precipitation scenarios are important in order to define separate scenarios for the peak discharge and for the runoff volume. The application of various methods (above all physically based methods) and extensive plausibility checks of the precipitation and runoff values were helpful to assess the results and to establish sound and realistic limits.

Keywords: Extreme floods, extreme precipitation, Probable Maximum Flood, PMF, Probable Maximum Precipitation, PMP, rainfall-runoff-model

1 Einleitung

Die Abschätzung extremer Niederschläge und Hochwasser ist wichtig für die Dimensionierung von Dämmen und kritischer Infrastruktur. Zur Dimensionierung werden oftmals die größten wahrscheinlichen Niederschläge für eine bestimmte Zeitdauer über einem bestimmten Gebiet, der sogenannte PMP (Probable Maximum Precipitation) verwendet. Der PMP wird in der Folge gebraucht, um das größte maximale Hochwasser PMF (Probable Maximum Flood) für einen Standort zu bestimmen (DOUGLAS et al. 2003). Dieses Vorgehen ist Standard für das Design von Dämmen in vielen Teilen der Welt, z.B. in den Vereinigten Staaten (HANSEN 1987), in China (DAOJIANG et al. 1984), Indien (RAKHECHA et al. 1985), Spanien (BENITO et al. 2005) und in der Tschechischen Republik (REZACOVA et al. 2005). Für die Abschätzung des PMP und PMF gibt es allerdings keine bewährte Vorgehensweise. Solche Extremereignisse entziehen sich mit ihren

kleinen Eintretenswahrscheinlichkeiten der Beobachtung. Es existieren jedoch verschiedene Methoden (z.B. BWG 2003, DOUGLAS et al. 2003, WMO 2009), welche aber auch kontrovers diskutiert werden (KOUTSOYIANNIS et al. 2011). Eine Übersicht und Details zu den verschiedenen Methoden sind in Abschnitt 3.1 dargestellt.

Bei einer Überflutung der Stadt Zürich durch die Sihl sind Hochwasserschäden im Milliardenbereich zu erwarten (SCHWANBECK et al. 2007). Seit 1937 besteht im Sihl-Einzugsgebiet der Sihlsee, der die Hochwasserspitzen im Mittel- und Unterlauf der Sihl dämpft (Abb. 1). Das Einzugsgebiet des Sihlsees umfasst 157 km² (Sihl bis Zürich: 336 km²), die Fläche des Sihlsees beträgt 10,7 km². Das Einzugsgebiet erstreckt sich zwischen 889 m und 2.282 m, bei einer mittleren Höhe von 1.243 m ü. M. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 1.935 mm (Gebietsniederschlag, Periode 1901–2011). Das Abflussregime kann als nivo-pluvial-préalpin bezeichnet werden (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992).

Geologisch lässt sich das Gebiet (von S nach N) in die drei Hauptbereiche Klippen, Flysch und Subalpine Molasse unterteilen. Die Klippen bestehen aus harten Kreide-Kalken, Flysch ist geprägt durch eine starke Wechsellagerung von Mergel-, Tonschiefer- und Sandsteinschichten. Die Verwitterungsprodukte des Flysch sind sehr lehmig bis tonig und zeigen geringe Durchlässigkeit. Die Subalpine Molasse setzt sich aus Nagelfluh, Sandsteinen und Mergeln zusammen. Entsprechend Geologie, Relief, Vegetation, Klima und Nutzung entwickelten sich unterschiedliche Böden. Im Bereich der Klippen bildeten sich durchlässige Rendzinaböden. In der Region des Flysch sind nasse und feuchte Böden (Gleye) weit verbreitet, die ein kleines bis mittleres Speichervermögen aufweisen. Im Gebiet der Subalpinen Molasse finden sich v.a. Braunerdeböden mit mäßigem bis großem Speichervermögen.

In der Folge der Hochwasserabflüsse im August 2005 wurde für die Sihl ein hydrologisches Vorhersagesystem entwickelt (ADDOR et al. 2011, ZAPPA et al. 2010). Im Rahmen des Projektes „Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat“ des Kantons Zürich soll der Sihlsee durch ein neues Wehrreglement besser für den Hochwasserschutz von Zürich genutzt werden. Weitere Maßnahmen wie z.B. der Bau eines Entlastungsstollens oder der Ausbau der Pumpspeicherung am Etzel-Kraftwerk beim Sihlsee werden im Rahmen dieses Projektes geprüft.

In einer Studie der SCHERRER AG (2013) wurde die Hochwasserentstehung im Sihl-Einzugsgebiet detailliert analysiert, wobei insbesondere die Hydrologie des Sihlsees, auslösende Niederschläge und historische Hochwasser untersucht wurden. Gemeinsam mit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (2014) und der TK CONSULT AG (2013) wurden auf dieser Grundlage die Hochwasserabflüsse HQ_{100} und HQ_{300} an der Sihl untersucht.

Die Auslegung des Betriebs der Wehranlagen des Sihlsees basiert bisher auf vorgegebenen Ganglinien eines fiktiven „Dreieck“-Hochwassers mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren (HQ_{1000}) sowie eines Extremfalls ($HQ_{Sintflut}$). Diese fiktiven Hochwasser werden im Folgenden als BfE-Szenarien bezeichnet (Ganglinien des BfE = Schweizer Bundesamt für Energie, dargestellt in ETZELWERK AG 2002). Diese Grundlagen zum Wehrreglement wurden nun überarbeitet und Ganglinien für das Bemessungshochwasser (HQ_{1000}) sowie das Sicherheits-hochwasser (PMF) auf physikalischer Grundlage erarbeitet.

Die Struktur des folgenden Artikels orientiert sich an der Abfolge der Untersuchung und verzichtet auf eine strengere Gliederung in einen methodischen Teil und dessen Auswertung und Diskussion. Zunächst wird im Folgen-

den die Herleitung extremer Niederschläge erläutert (Kapitel 2). In Kapitel 3 wird auf die Abschätzung extremer Hochwasserabflüsse eingegangen. Nach einer kurzen Übersicht und Diskussion zum PMF (Kapitel 3.1) werden das verwendete Niederschlag-Abfluss-Modell PREVAH und die Niederschlagsszenarien erläutert (Kapitel 3.2). Anschließend werden die Modellresultate vorgestellt und aufgezeigt, wie ihre Plausibilität überprüft wurde (Kapitel 3.3). Abschließend werden die Ergebnisse und Schlussfolgerungen in einem Fazit zusammengefasst (Kapitel 4).

2 Herleitung extremer Niederschläge

2.1 Niederschläge mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren (P_{1000})

Niederschläge zeigen eine individuelle zeitliche und räumliche Verteilung. Das bedeutet, dass Niederschläge, die an einzelnen Messstationen punktuell gemessen werden, nicht ohne weiteres auf ganze Einzugsgebiete übertragen werden können. Deshalb wurde für das Einzugsgebiet des Sihlsees eine Gebietsniederschlagsstatistik erarbeitet (SCHERRER AG 2013). Extremniederschläge mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren (P_{1000}) wurden aus dieser lokalen Gebietsniederschlagsstatistik extrapoliert. Nach VERWORN & KUMMER (2006) führt dieses Vorgehen für Wiederkehrperioden von bis zu 10.000 Jahren zu plausiblen Ergebnissen. VERWORN & KUMMER (2006) testeten verschiedene Verteilungsfunktionen für die Festlegung von Niederschlägen mit Wiederkehrperioden bis 10.000 Jahren. Angesichts der Tatsache, dass aus einer Datenreihe von ca. 100 Jahren Werte mit viel höheren Wiederkehrperioden extrapoliert werden, stellen sie einerseits die Zulässigkeit der Extrapolation grundsätzlich in Frage. Andererseits zeigte sich in ihrer Untersuchung, dass die resultierenden Niederschlagshöhen plausibel waren und dass sich die Ergebnisse verschiedener Verteilungsfunktionen nicht wesentlich unterschieden.

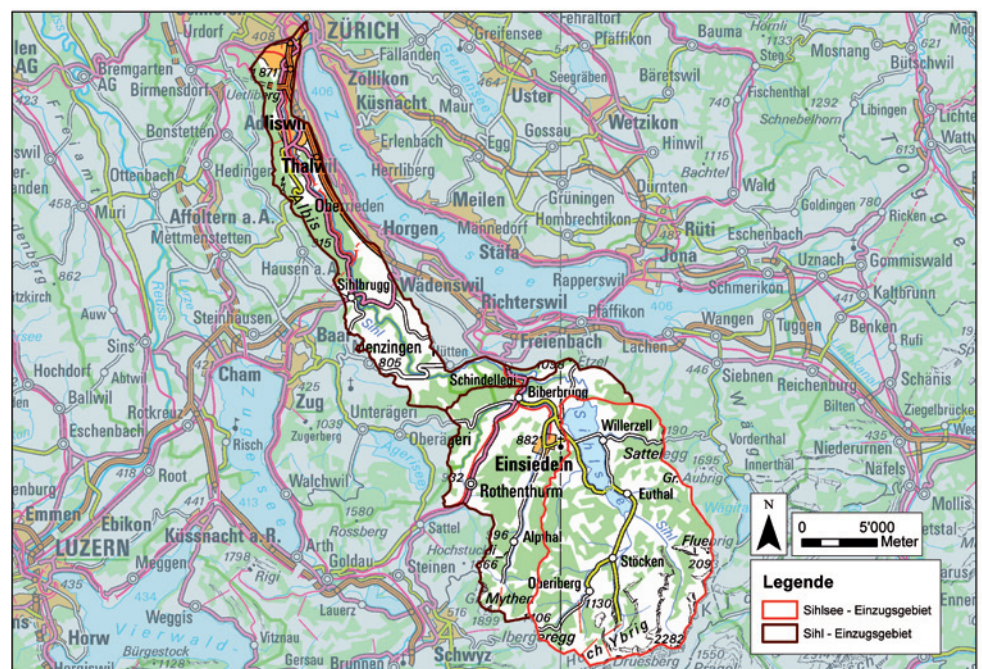


Abbildung 1

Übersicht des Sihlsee-Einzugsgebiets und des Sihl-Einzugsgebiets (Kartendaten: pixmaps© 2014 swisstopo (5704 000 000))

Overview of the catchments of Lake Sihl and river Sihl (map data: pixmaps© 2014 swisstopo (5704 000 000))

Als Datengrundlage für die Gebietsniederschlagsstatistik wurden tägliche Gebietsniederschlagswerte auf der Grundlage von 43 Messstationen für den Zeitraum 1901–2011 berechnet (FREI et al. 1998, ISOTTA et al. 2014, METEOSCHWEIZ 2012). Die Tageswerte der Gebietsniederschläge wurden extremwertstatistisch für die Teil-Einzugsgebiete sowie für das Gesamt-Einzugsgebiet der Sihl ausgewertet. Zunächst wurden die Jahresmaxima der Niederschläge verschiedener Dauer (1 d–5 d) ermittelt. In einem weiteren Schritt wurden die Jährlichkeiten für diese Jahresmaxima nach WEIBULL (1939) bestimmt und jeweils an eine generalisierte Extremwertverteilung (Generalized Extreme Value Distribution, GEV) mit Hilfe der Maximum Likelihood Estimation angepasst. Im Einzelnen wurde dabei nach REISS & THOMAS (2007) vorgegangen. Die kalendarischen Tageswerte wurden entsprechend WEISS (1964) korrigiert, wobei die extrapolierten 1-Tages-Werte mit einem Faktor von 1,143 multipliziert werden. Nach GEIGER et al. (1991) wurden die Niederschläge < 24 h Dauer durch Extrapolation der 1- bis 5-Tageswerte bestimmt. Durch die Extrapolation weisen insbesondere die Werte für sehr kurze Dauern große Unsicherheiten auf. Entsprechend GREBNER & ROESCH (1998) wurden deshalb die Niederschläge kurzer Dauer (< 12 h) korrigiert. Die resultierenden P_{1000} verschiedener Dauer sind in Abbildung 3 dargestellt.

2.2 Probable Maximum Precipitation (PMP)

Der sogenannte Probable Maximum Precipitation (PMP) gibt eine obere Grenze von Niederschlagsmengen an, die in einem bestimmten Gebiet während einer bestimmten Zeit abhängig von den lokalen klimatischen Randbedingungen fallen können (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY 1959). Dem PMP wird keine Wiederkehrperiode zugeordnet. Das Wort probable deutet vielmehr an, dass der abgeschätzte Wert aus Sicht des Bearbeiters realistisch ist, sich aber nicht zuverlässig festlegen lässt. Es ist ein best estimate eines Niederschlags, der physikalisch maximal möglich ist.

Es ist schwierig zu eruieren, welche Methode die verlässlichsten Resultate liefert zur Bestimmung des PMP. Somit ist es den Experten überlassen, die Gebietscharakteristiken und die vorhandenen Daten zu evaluieren und die bestmöglichen Methoden aus-

zuwählen (WANG 1984). KOUTSOYIANNIS et al. (2011) empfehlen sogar das Konzept eines oberen Limits von Niederschlägen zu verwerfen. Der PMP-Wert sollte demnach eher als ein Näherungswert angesehen werden, welcher sich in einem bestimmten Bereich ändern kann, abhängig von den Daten, welche benutzt wurden und den Annahmen, welche für die Abschätzung gemacht wurden (WANG 1984).

2.2.1 Übersicht der Methoden zur Herleitung des PMP

Zur Abschätzung des PMP unterscheidet man empirische, statistische und deterministische (meteorologische) Methoden. Empirische Methoden basieren auf Zusammenstellungen von weltweit bzw. regional maximalen Niederschlagspunktmessungen. Verschiedene Bearbeiter entwickelten aufgrund solcher Zusammenstellungen Schätzformeln zur Berechnung des PMP (z.B. DYCK et al. 1995). Diese Schätzformeln lehnen sich umhüllend an die größten weltweit beobachteten Werte an. Es zeigt sich, dass die globalen PMP-Schätzformeln erwartungsgemäß weit über den regionalen Beobachtungen liegen und für die vorliegende Studie nicht verwendet werden können (Abb. 2).

Statistische Methoden basieren auf einfachen Formeln, mit denen anhand von statistischen Kennwerten auf den PMP-Wert extrapoliert wird. Die bekannteste und am meisten benutzte Formel wurde von Hershfield (HERSHFIELD 1961a, 1961b, 1965) entwickelt:

$$PMP = Pa + k\sigma \quad (1)$$

(Pa ist das Mittel der beobachteten jährlichen Niederschlags-Tagesmaxima, k = Distribution-Faktor zur Maximierung, σ = Standardabweichung des maximalen jährlichen Niederschlags). Die meisten von Hershfield verwendeten 2.645 Niederschlagsstationen liegen in Nordamerika. Untersuchungen zeigten, dass bei der Übertragung in andere Klimazonen Anpassungen notwendig sind (NAEF et al. 1998). Für die vorliegende Studie wurde ein Distributions-Faktor von $k = 12,5$ verwendet, den BÜCHNER (1970) anhand von 44 Messstationen in Mitteleuropa ermittelte.

Deterministische (meteorologische) Methoden: Meteorologische Methoden sind aufwändiger und benötigen detaillierte Daten. Dabei wird der Niederschlag aufgrund von physikalischen Überlegungen maximiert. Für die Größe des Niederschlags ist die Geschwindigkeit der vertikalen Hebung der Luft und der verfügbare Wasserdampf wesentlich. Die Effizienz von beobachteten Niederschlagsereignissen wird mit dem Verhältnis zwischen beobachteter Intensität und Wassergehalt in der Atmosphäre beschrieben (GREBNER & ROESCH 1998). Der maximale Wasserdampfgehalt in der Troposphäre muss geschätzt werden. Dies kann durch die Extrapolation der atmosphärischen Feuchte-schichtung basierend auf Luftfeuchtemessungen am Boden (Taupunkt) oder durch Radiosondenprofile in der Troposphäre abgeleitet werden. Der PMP kann dann durch das Produkt aus maximaler Effizienz und maximalem Wasserdampfgehalt hergeleitet werden.

Auf der Grundlage ähnlicher Überlegungen wurden in DVWK (1997) sog. Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland ermittelt. Auch GREBNER & ROESCH (1998) verwendeten einen ähnlichen Ansatz, um maximal mögliche Niederschläge in der Schweiz herzuleiten. Ein Schwerpunkt wurde dabei auf die Analyse der Beziehungen zwischen Flächen, Mengen und

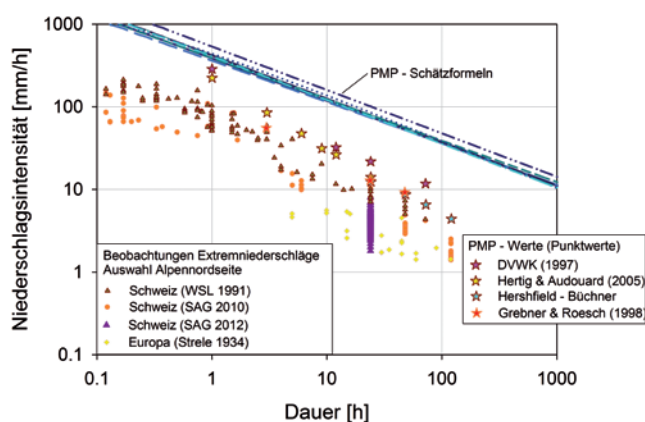


Abbildung 2

Zusammenstellung beobachteter Extremniederschläge und Vergleich mit PMP-Werten (Punktwerte) nach verschiedenen Bearbeitern bzw. Methoden

Compilation of observed extreme precipitation and comparison with PMP-values (point values) according to several authors and/or methods

Dauer zur Bestimmung von maximierten Gebietsniederschlägen gelegt. HERTIG & AUDOUARD (2005) stellten PMP-Punktniederschläge in einem 2 x 2 km-Raster für die Schweiz bereit, welche die topographischen Gegebenheiten und die Physik der Niederschlagsbildung berücksichtigen.

2.2.2 PMP-Werte für das Sihlsee-Einzugsgebiet: Punkt-Niederschlag

Der Empfehlung der WMO (2009) folgend wurden die PMP-Werte der verschiedenen Methoden und Quellen zusammengestellt und mit beobachteten Extremwerten verglichen (Abb. 2). Die weltweit erfassten Rekordwerte wurden durch Taifune oder tropische Zyklone erzeugt und treten in gemäßigten Klimaten nicht auf. Deshalb wurden in Abbildung 2 Niederschlagsrekordwerte der Schweizerischen Alpennordseite und angrenzenden Regionen für den Vergleich mit den lokalen PMP-Werten ausgewählt. Nicht nur die Schätzformeln, sondern auch die Werte aus DVWK (1997) liegen weit über den Beobachtungen. Die DVWK-Werte wurden für Deutschland entwickelt und sind stark durch die besondere Niederschlagssituation des Allgäus beeinflusst, weshalb sie für die vorliegende Studie nicht weiter verwendet wurden.

Die Werte aus GREBNER & ROESCH (1998), HERTIG & AUDOUARD (2005) und berechnet nach BÜCHNER (1970) bzw. HERSHFIELD (1965) sind teilweise deutlich höher als die größten beobachteten Werte, liegen jedoch in einem realistischen Bereich (Abb. 2). Daher wurden diese drei Methoden für die weitere Bearbeitung verwendet.

2.2.3 PMP-Werte für das Sihlsee-Einzugsgebiet: Gebiets-Niederschlag

PMP-Niederschlagswerte, die als Punktwerte hergeleitet wurden, können nicht ohne weiteres auf das Sihl-Einzugsgebiet (Gebiets-Niederschlag) übertragen werden. Die PMP-Werte der ausgewählten drei Methoden wurden nach GREBNER & ROESCH (1998) auf die Einzugsgebietsgröße des Sihlsees (157 km²) übertragen, d.h. um 15 % (24 h-Werte) bis zu 45 % (3 h-Werte) abgemindert (Abb. 3). Zur Festlegung der PMP-Werte für das Sihlsee-Einzugsgebiet wurde schließlich eine Umhüllende der Gebietswerte berechnet (Abb. 3).

3 Abschätzung extremer Hochwasser

3.1 Methoden zur Herleitung des PMF

Empirische Methoden zur Herleitung des PMF basieren analog zum PMP auf den größten Beobachtungen, aus denen sich Umhüllende ableiten lassen. Beispielsweise gibt VISCHER (1980) für das Einzugsgebiet des Rheins folgende Näherungsformel für die spezifischen Höchstabflüsse an:

$$q_{\max} = 50 \cdot E^{0,5} \quad (2)$$

($q_{\max}$ = spezifischer Maximalabfluss in m³/s/km², E = Einzugsgebiet-Fläche in km²). Diese Schätzformel stützt sich auf die durch ASF (1974) in der Schweiz erhobenen Daten. Ähnliche Formeln entwickelten beispielsweise WUNDT (1965) und WMO (2009) auf der Basis der weltweit größten beobachteten Abflüsse. Ohne die Verwendung weiterer Methoden sind solche Umhüllenden jedoch ungeeignet, denn die Eigenheiten eines Gebiets werden abgesehen von der Fläche nicht berücksichtigt. Die Schätzformeln von WUNDT (1965) und WMO (2009)

beruhen v.a. auf Beobachtungen in tropischen und monsunalen Klimazonen und können nicht auf die Schweiz übertragen werden.

Eine Häufigkeitsverteilung der Jahresmaxima der Abflüsse wird geprägt von den individuellen Eigenschaften eines Einzugsgebiets. Die Festlegung des PMF anhand einer Frequenzanalyse ist deshalb einer generalisierten Formel vorzuziehen. Dabei liegt es allerdings im Ermessen des Bearbeiters, um welchen Faktor er das 100- oder 1.000-jährliche Hochwasser erhöht, um auf das PMF zu schließen (z.B. 1,3-1,5 * HQ_{1000}) (BWG 2003, HARRIS et al. 2011). Einen modifizierten Ansatz verfolgt die GRADEX Methode (GUILLOT et al. 1967), die davon ausgeht, dass jeglicher zusätzlicher Niederschlag ab einem Schwellenwert abflusswirksam wird. Sowohl ICOLD (1992) als auch WMO (2009) empfehlen, die Frequenzanalyse mit historischen Ereignissen zu ergänzen, um die Abschätzungen besser abzustützen.

CHOW et al. (1988), BFE (2008) und WMO (2009) empfehlen, für die Abschätzung des PMF Niederschlag-Abfluss-Modelle (NAM) unter Verwendung des PMP zu verwenden. Mit diesem Vorgehen lassen sich individuelle Eigenschaften des Einzugsgebietes berücksichtigen (LAWRENCE et al. 2014). Entsprechend wurde zur Abschätzung von PMF in kleinen, hochalpinen Einzugsgebieten das NAM CRUEX entwickelt (BWG 2003, ZELLWEGER & MUSY 2000). CRUEX geht jedoch von einem vereinfachten Infiltrationsverhalten und einem maximierten Abflussbeiwert aus. GUTKNECHT et al. (2006) schlagen einen Mehr-Standbeine-Ansatz zur Herleitung von Bemessungshochwassern vor. Dabei werden Hochwasserstatistiken mit NAM-Berechnungen und mit dem GRADEX-Verfahren kombiniert. In der vorliegenden Studie wurde sowohl das HQ_{1000} als auch das PMF mit dem NAM PREVAH (Kapitel 3.2.1) auf der Grundlage der in Kapitel 2 festgelegten Niederschläge berechnet.

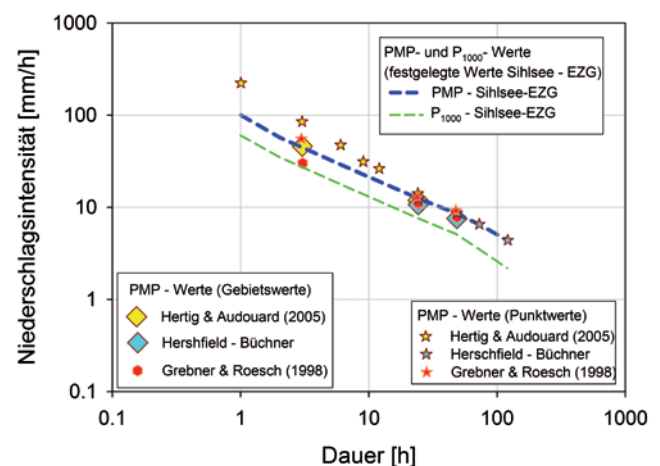


Abbildung 3

PMP-Werte (Punktwerte) nach verschiedenen Bearbeitern bzw. Methoden und daraus nach GREBNER & ROESCH (1998) abgeleitete PMP-Werte (Gebietswerte, Sihlsee-Einzugsgebiet) sowie für das Sihlsee-Einzugsgebiet festgelegte PMP und P_{1000} -Werte
PMP-values (point values) according to several authors and/or methods, and derived PMP-values (area-values, Lake Sihl catchment) according to GREBNER & ROESCH (1998), and defined PMP and P_{1000} -values for the Lake Sihl catchment

3.2 Methodik der Abflussberechnungen

3.2.1 Grundlagen und Aufbau des Niederschlag-Abfluss-Modells PREVAH

Das verwendete hydrologische Modell PREVAH (Precipitation-Runoff-EVapotranspiration HRU related Model; VIVIROLI et al. 2009b) ist ein konzeptionelles, flächendifferenziertes Modell zur Bestimmung des Wasserhaushalts in Einzugsgebieten. Die räumliche Diskretisierung von PREVAH basiert auf der Aggregation von räumlichen Rasterdaten in so genannte Hydrotope (engl. hydrological response units, HRU), also in Teilflächen mit ähnlichen Eigenschaften bezüglich Topographie, Landnutzung und Bodentiefe (GURTZ et al. 1999).

3.2.2 Kalibrierung des Modells PREVAH

Die Basiskalibrierung des hydrologischen Modells (SCHWANBECK et al. 2007, VIVIROLI et al. 2009c) für die Teil-Einzugsgebiete der Sihl erfolgte im Rahmen der Studie zur Analyse des Hochwasserereignisses im August 2005 (ADDOR et al. 2011) und wurde für das vorliegende Projekt optimiert mit dem Ziel, eine zuverlässige Simulation der größten Hochwasser im Sihl-Einzugsgebiet zu erreichen (WSL 2014). Für die optimierte Modell-Version wurde die räumliche Auflösung von 500 x 500 m auf 100 x 100 m erhöht. Es wurden zwölf justierbare gebietsspezifische Parameter von PREVAH bestimmt. Dies erfolgte entweder durch Kalibrierung gegenüber beobachteten Abflussganglinien (Minster) oder durch Regionalisierung nach der Methodik von VIVIROLI et al. (2009a, 2011).

Für die Anwendung im Sihlsee-Einzugsgebiet wurde PREVAH mit Stundenwerten angetrieben. Die Kalibrierung erfolgte durch Vergleich zu den täglichen Seezuflüssen, nachdem in einem ersten Schritt das Modell gegenüber gemessenen stündlichen Abflüssen der Minster (Kopfeinzugsgebiet innerhalb des untersuchten Zuflussgebiets) geeicht wurde. Die in Abbildung 4 gezeigten Daten für andere Zeitschritte sind durch Auswertung der erhaltenen Daten im Tageschritt erfolgt. Es wurde keine separate Eichung für verschiedene Zeitfenster durchgeführt. Bei der Eichung wurden Parameterkombinationen bevorzugt, die sowohl für Hochwasser wie auch für mittlere Abflüsse robuste Resultate liefern. Folglich zeigen simulierte Niedrigwasserabflüsse gelegentlich schlechtere Resultate.

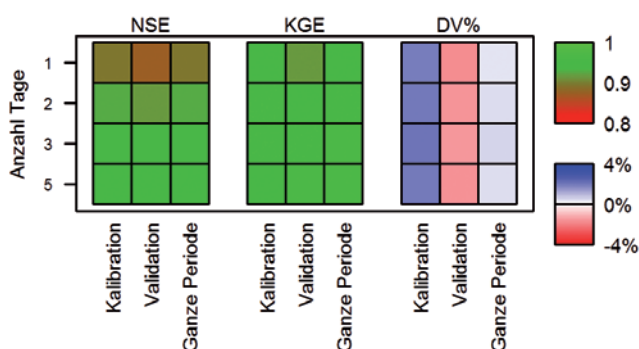


Abbildung 4

Gütemaße für die kumulierten Sihlseezuflüsse unterschiedlicher Dauer (1–30 Tage) für die Kalibrationsperiode (1999–2005), Validationsperiode (2006–2011) und die ganze Periode (1999–2011). Nash-Sutcliffe Efficiency NSE, Kling-Gupta Efficiency KGE und Volumenabweichung DV% *Efficiency criteria for cumulated Lake Sihl inflows of varying durations (1–30 days) for the calibration period (1999–2005), validation period (2005–2011) and the full period (1999–2011). Nash-Sutcliffe Efficiency NSE, Kling-Gupta Efficiency KGE and volume deviation DV%*

Für die Kalibrierung wurden die Jahre 1999 bis 2005 verwendet. Die beobachteten Zuflussganglinien stammen aus SCHERRER AG (2013). Die Gütewerte (Nash-Sutcliffe Efficiency NSE (NASH & SUTCLIFFE 1970), Kling-Gupta-Efficiency KGE (GUPTA et al. 2009) und die Abweichung des mittleren simulierten vom mittleren beobachteten Abflussvolumen DV% zeigen sehr gute Werte für die Kalibrations- (1999–2005) und Validationsperiode (2006–2011) (Abb. 4). Die NSE-Werte für die kumulierten 1-Tages- bis 30-Tages-Abflussvolumen bewegen sich zwischen 0,88 und 0,98, die KGE-Werte zwischen 0,92 und 0,97 und die Abweichung des Volumens zwischen -1,83 und 2,09 %. Die Simulation von historischen Hochwasserereignissen (1999, 2005, 2007, 2011) für die kumulierten 1-Tage- und 5-Tage-Abflussvolumen zeigt eine relativ gute Übereinstimmung mit der beobachteten Ganglinie (Abb. 5). Die Spitze des Abflussvolumens wird z.B. in 2005 unterschätzt, was zu einem Volumendefizit von -4,95 % (kumulierte 1-Tagewerte) führt, der NSE-Wert ist jedoch mit 0,95 hoch. Das kumulierte 5-Tage-Abflussvolumen in 1999 zeigt eine deutliche Unterschätzung mit der Simulation, was zu einem Volumendefizit für die abgebildete Periode führt.

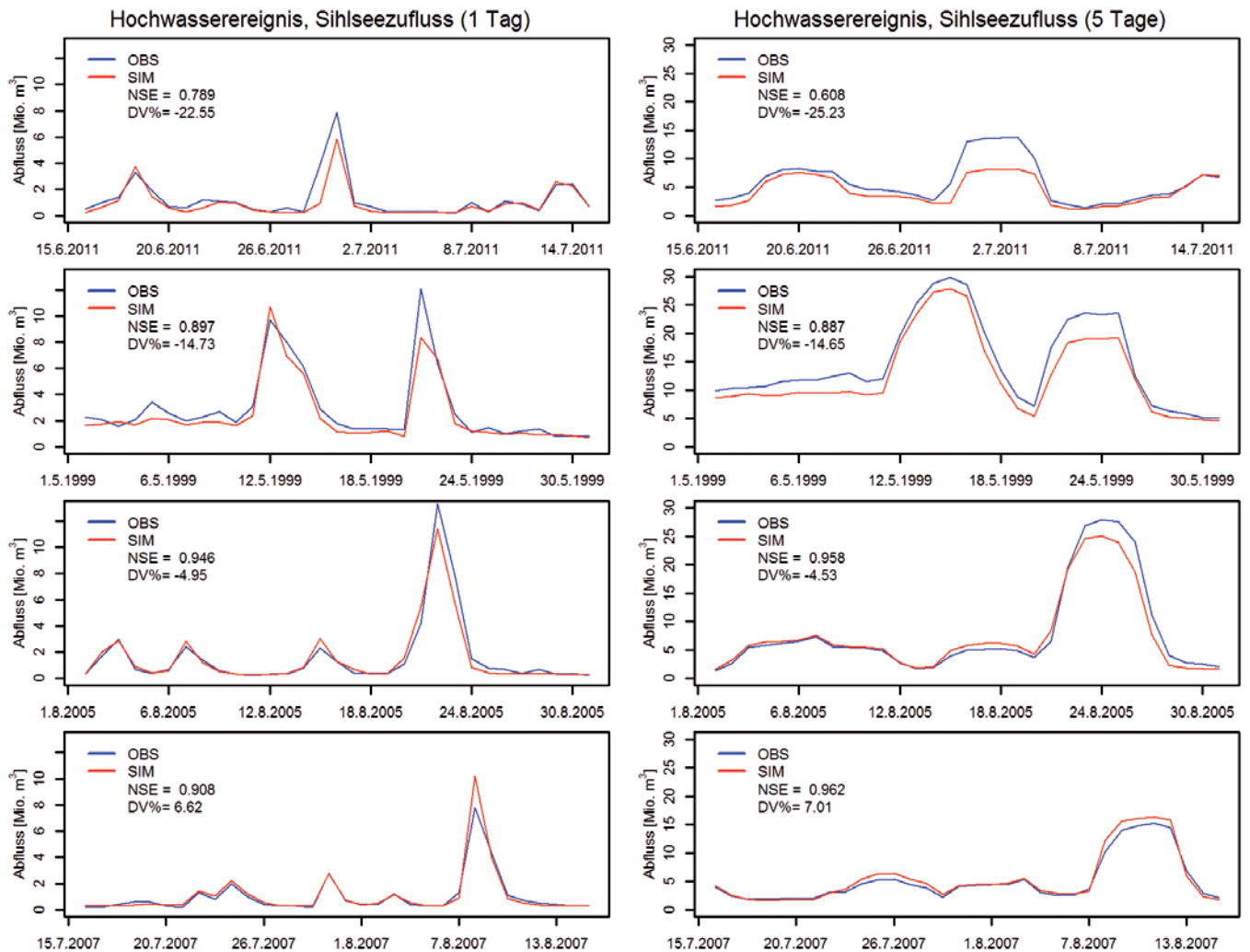
3.2.3 Niederschlagsszenarien

Um Hochwasserabflüsse mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell PREVAH abzuschätzen, wurden Berechnungen mit Niederschlagsszenarien unterschiedlicher Dauer zwischen 1 h und 48 h durchgeführt (Tab. 1). Die Analyse der P_{1000} - sowie der PMP-Werte (Kapitel 2) lieferte Gebietsniederschlagsmengen für bestimmte Dauern. Aus der Analyse der größten Hochwasser der Sihl ging hervor, welche Art und welche zeitlichen Verläufe von Niederschlagsereignissen imstande sind, große Hochwasser auszulösen (SCHERRER AG 2013). Dies waren sehr unterschiedliche Ereignisse: Einerseits langandauernde Ereignisse bis zu 40 h Dauer mit hohen Niederschlagssummen und relativ gleichförmigem zeitlichem Verlauf sowie andererseits auch kurze Ereignisse mit einer Dauer von wenigen Stunden und ausgeprägt hohen Niederschlagsintensitäten. Dementsprechend wurde bei kurzen Niederschlagsszenarien bis 8 h Dauer entweder eine zeitliche Dreiecksverteilung angenommen mit der Niederschlagsspitze nach einem Drittel der Dauer oder der zeitliche Verlauf von großen Ereignissen übernommen, von denen hochaufgelöste Niederschlagsmessungen vorlagen (20.6.2007 und 29.6.2011). Für die Niederschläge > 12 h Dauer wurde eine gleichmäßige zeitliche Verteilung (Blockregen) verwendet oder die zeitliche Verteilung großer Ereignisse (9.9.1934 und 21.–22.8.2005). Zusätzlich wurden zwei Extrem-Szenarien verwendet mit einem ungünstigen zeitlichen Verlauf (intensiver Dauerregen mit abschließendem Gewitter: Ereignisse 11.8.2002 und 24.8.1987). Hinsichtlich der räumlichen Verteilung wurde in PREVAH das gesamte Einzugsgebiet gleichzeitig und gleichmäßig überregnet.

3.3 Resultate der Berechnungen von extremen Hochwassern

3.3.1 Resultate

Tabelle 2 zeigt die Resultate der Modellrechnungen. Alle Niederschlagsszenarien wurden jeweils mit zwei realistischen Boden-Vorfeuchtezuständen (wet bzw. mean) berechnet. Für die nasse Vorbedingung (wet) wurde der im hydrologischen Modell vorherrschende Speicherfüllzustand vor dem zweiten Hochwasser im Mai 1999 (20. Mai 1999) verwendet (2 mm Speicherdefizit im Bodenfeuchte-Modul des NAM). Als durchschnittlicher Vorfeuchtezustand (mean) wurde der Zustand vor dem Hochwasser im August 2007 genommen (11 mm Speicherdefizit im Bodenfeuch-

**Abbildung 5**

Kumuliertes Tages- (links) und 5-Tages-Abflussvolumen (rechts) (Mio. m³) von vier Hochwasserereignissen im Sihlsee-Einzugsgebiet. Die Gütewerte beziehen sich auf die ganze abgebildete Periode.
 Cumulated daily (left) and 5-day (right) discharge volumes (Mio. m³) of four flood events in the Lake Sihl catchment. The efficiency criteria are calculated for the displayed period.

Tabelle 1

Die für die Modellrechnungen verwendeten Niederschlagswerte (P_{1000} und PMP). Die Extrem-Szenarien sind fett gekennzeichnet.
 The precipitation values (P_{1000} and PMP) used for the model calculations. Extreme scenarios are marked in bold.

Niederschlags-dauer [h]	Wiederkehr-periode [Jahre]	Zeitliche Verteilung des Niederschlags	Niederschlagsmenge [mm] P_{1000}	Max. Niederschlagsintensität [mm/h] P_{1000}	Niederschlagsmenge [mm] PMP	Max. Niederschlagsintensität [mm/h] PMP
1	1000	Verlauf 2007	57.9	57.9	97.8	97.8
2	1000	Verlauf 2011	69	47.1	114.7	78.2
4	1000	Dreieck	80.5	35.2	132.5	58
8	1000	Dreieck	117.4	27	194.7	44.8
12	1000	Blockregen	154.1	12.8	256.1	21.3
16	1000	Verlauf 1934	164.2	32.6	273.6	54.3
24	1000	Blockregen	179.7	7.5	300.2	12.5
36	1000	Blockregen	213.4	5.9	361	10
48	1000	Verlauf 2005	241.1	12.1	411.5	20.6
24	1000	Verlauf 2002	179.7	24.8	300.2	41.5
24	1000	Verlauf 1987	179.7	26.7	300.2	44.6

Tabelle 2

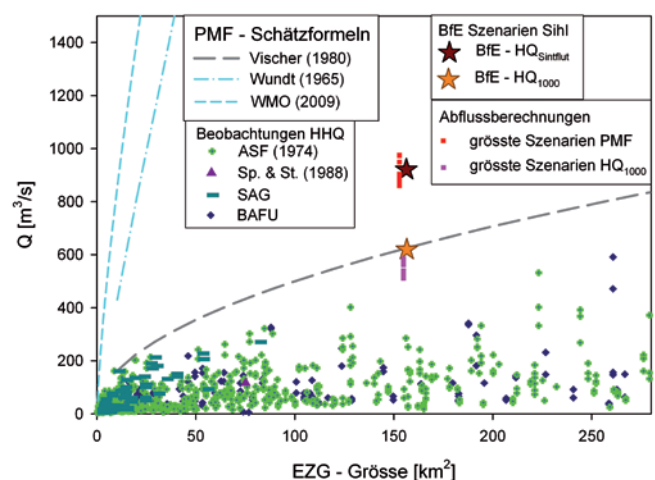
Zufluss zum Sihlsee: Die Resultate der Berechnungen für das HQ_{1000} und PMF. Die Extrem-Szenarien sind fett gekennzeichnet.
 Inflow to Lake Sihl: The results of the calculation for HQ_{1000} and PMF. Extreme scenarios are marked in bold.

Niederschlags- dauer [h]	Zeitliche Verteilung des Niederschlags	Vorfeuchte	Abflussspitze [m³/s]	Abfluss-Koeffizient	Abflussspitze [m³/s]	Abfluss-Koeffizient
			P_{1000}	P_{1000}	PMF	PMF
1h	Verlauf 2007	Wet	437	0.75	786	0.84
		Mean	339	0.6	677	0.73
2h	Verlauf 2011	Wet	472	0.76	820	0.84
		Mean	387	0.64	728	0.75
4h	Dreieck	Wet	495	0.78	843	0.85
		Mean	416	0.68	759	0.78
8h	Dreieck	Wet	575	0.85	975	0.9
		Mean	509	0.76	904	0.84
12h	Blockregen	Wet	520	0.87	866	0.91
		Mean	488	0.81	832	0.87
16h	Verlauf 1934	Wet	537	0.87	894	0.91
		Mean	509	0.81	862	0.87
24h	Blockregen	Wet	322	0.87	538	0.91
		Mean	310	0.82	524	0.88
36h	Blockregen	Mean	248	0.84	422	0.89
		Wet	263	0.88	439	0.92
48h	Verlauf 2005	Wet	354	0.87	599	0.92
		Mean	337	0.85	579	0.89
24h	Verlauf 2002	Wet	585	0.87	976	0.91
		Mean	563	0.82	950	0.88
24h	Verlauf 1987	Wet	541	0.87	905	0.91
		Mean	523	0.82	883	0.87

te-Modul des NAM). Die beiden Extrem-Szenarien mit 24 h Dauer und einem ungünstigen zeitlichen Verlauf erzeugen geringfügig größere Abflussspitzen im Vergleich mit den größten normalen Niederschlagsszenarien, bei denen die Szenarien von 8 h bis 16 h Dauer die größten Abflussspitzen erzeugen. Teilweise führen unterschiedliche Szenarien zu ähnlichen Ergebnissen. Diese typische Eigenschaft hydrologischer Systeme wird als Äquifinalität bezeichnet. Die Abflussbeiwerte sind mit bis zu 87 % (HQ_{1000}) bzw. bis zu 92 % (PMF) sehr hoch. Dies stimmt überein mit der Analyse der größten Hochwasserereignisse der Sihl seit 1910, die zeigte, dass im Sihlsee-Einzugsgebiet hohe Abflussbeiwerte bis über 80 % auftraten (SCHERRER AG 2013).

3.3.2 Überprüfung der berechneten Abflussspitzen

Abbildung 6 zeigt den Vergleich der berechneten Modellergebnisse mit beobachteten Extremabflüssen und den Werten der BfE-Szenarien (ETZELWERK AG 2002, Kapitel 1). Zum Vergleich wurden auch die PMF-Schätzformeln aus Kapitel 3.1 dargestellt. Bei den beobachteten Extremabflüssen wurde eine Auswahl von Beobachtungen aus der Nordschweiz und angrenzenden Regionen getroffen. Es handelt sich dabei um Zusammenstellungen beobachteter bzw. rekonstruierter extremer Hochwasserabflüsse (z.B. ASF 1974). In diesen Messwerten extremer Hochwasserabflüsse können beträchtliche Fehler enthalten sein, die nicht quantifiziert werden können. Die Werte wurden von unterschiedlichen Bearbeitern mit verschiedenen Methoden abgeschätzt und sind daher von sehr unterschiedlicher Güte.


Abbildung 6

Zusammenstellung von beobachteten Extremhochwassern (momentane Spitzenwerte) im Vergleich zu den berechneten Modellergebnissen (1 h-Werte), den Werten der BfE-Szenarien und den Schätzformeln. (Sp. & St. = Spreafico & Stadler; SAG = Werte aus diversen Berichten der Scherrer AG; BAFU = Werte aus diversen Berichten des Schweizer Bundesamtes für Umwelt)

Compilation of observed extreme floods (momentary peak flow) compared to the calculated model results (1 h-values), the values of the BfE-scenarios and the estimation formulas. (SAG = various reports by Scherrer AG; BAFU = various reports by the Swiss Bundesamt für Umwelt)

Die Abflussspitzen der errechneten HQ_{1000} und PMF überschreiten die beobachteten Ereignisse deutlich und sind im Bereich der BfE-Szenarien. Die Gründe dafür liegen in der hohen Abflussbereitschaft des Sihlsee-Einzugsgebietes sowie an der gleichzeitigen Überregnung des gesamten Einzugsgebiets in PREVAH, was bei natürlichen Ereignissen nur auf wenige km^2 beschränkt sein dürfte. Der Vergleich mit den PMF-Schätzformeln zeigt, dass die Schätzformel von VISCHER (1980) im Bereich der errechneten HQ_{1000} liegt, hingegen liegen die von WUNDT (1965) und WMO (2009) entwickelten Schätzformeln erwartungsgemäß weit über den Berechnungen. Diese beruhen v.a. auf Beobachtungen in tropischen und monsonalen Klimazonen und können nicht auf die Schweiz übertragen werden. Die Resultate der berechneten Abflussspitzen wurden mit den Erkenntnissen aus SCHERRER AG (2013) in einem Frequenzdiagramm zueinander in Beziehung gesetzt und so zusätzlich hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Es zeigt sich, dass bei einer Extrapolation der Werte mit einer Wiederkehrperiode von 100 und 300 Jahren die Werte für den HQ_{1000} plausibel sind. Die PMF-Werte können nicht direkt einer Wiederkehrperiode zugeordnet werden, sind jedoch deutlich über den Werten, die eine Extrapolation auf 10.000 Jahre ergibt.

3.3.3 Überprüfung der berechneten Abflussvolumen

In SCHERRER AG (2013) wurden die Tageswerte der Seezuflüsse für den Zeitraum 1901–2011 statistisch ausgewertet (Abb. 7). Dafür wurden zunächst die Jahresmaxima der Seezuflüsse ermittelt. In einem weiteren Schritt wurden die Jährlichkeiten bzw. die plotting position für diese Jahresmaxima nach WEIBULL (1939) bestimmt und jeweils an eine generalisierte Extremwertverteilung (Generalized Extreme Value Distribution, GEV) mit Hilfe der Maximum Likelihood Estimation angepasst. Im Einzelnen wurde dabei nach REISS & THOMAS (2007) vorgegangen. Mit diesen Daten und der extremwertstatistischen Extrapolation konnten die berechneten Abflussvolumen verglichen und überprüft werden. Zum besseren Vergleich der kalendarischen 1-Tages-Werte mit den berechneten 24 h-Werten ist die Extrapolation der Beobachtungen in Abbildung 7 zusätzlich nach WEISS (1964) kalendarisch korrigiert dargestellt. Die Abflussvolumen der errechneten HQ_{1000} -Ganglinien liegen im Bereich der auf eine Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren extrapolierten beobachteten Seezuflüsse, können also als plausibel betrachtet werden. Die Extrem-Szenarien mit einem sehr ungünstigen zeitlichen Verlauf verursachen kaum größere Abflussvolumen als die größten normalen Szenarien (Tab. 2). Die 24 h-Volumen der BfE-Szenarien liegen beim HQ_{1000} deutlich über den berechneten Werten (ca. 20 %), beim PMF etwas über den berechneten Werten (ca. 5 %).

3.3.4 Zusammenhang zwischen Abflussvolumen und Abflussspitze

Die Ganglinien der Extrem-Hochwasser sind einerseits durch ihre Abflussspitze und andererseits durch ihr Abflussvolumen charakterisiert. In Abbildung 8 ist der Zusammenhang zwischen Abflussvolumen und Abflussspitze der Modellrechnungen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Abflussspitzen bei den Szenarien mit einer Niederschlagsdauer von mehr als 24 h (blau umkreist) stark abnehmen. Diese lang andauernden Szenarien bringen zwar große Abflussvolumen, haben aber relativ kleine Abflussspitzen, da die Niederschlagsintensität bei den langandauernden Niederschlägen sehr stark abnimmt. Das bedeutet für die Festlegung einer Bemessungshochwasser- bzw. Sicherheitshochwasser-

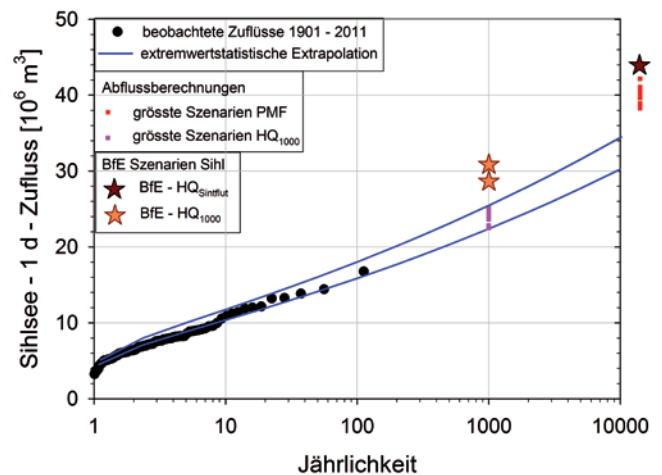


Abbildung 7

Beobachtete 1-Tages-Seezuflüsse 1901–2011, extremwertstatistische Extrapolation und Vergleich mit den größten berechneten 24 h-Modellergebnissen und den 24 h-Werten der BfE-Szenarien
Observed 1-day-lake-inflow 1901–2011, extrapolation from extreme-value statistics and comparison with the calculated 24 h model results and the 24 h-values of the BfE-scenarios

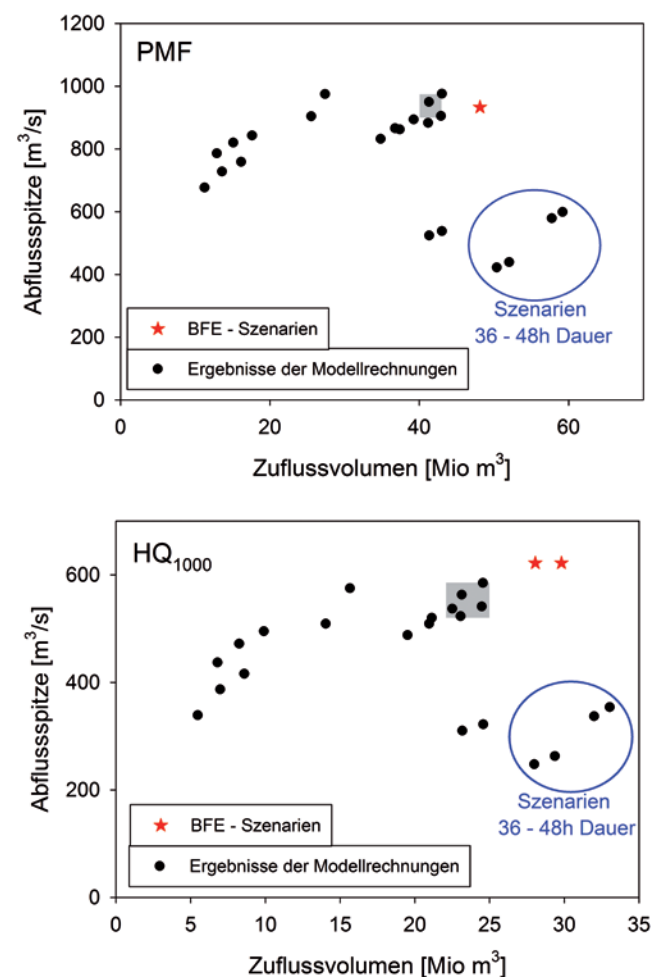


Abbildung 8

Zusammenhang zwischen Abflussvolumen und Abflussspitze bei den Modellrechnungen sowie bei den BfE-Szenarien (rot gekennzeichnet). Oben: HQ_{1000} , unten: PMF
Correlation between discharge volume and discharge peak of the model calculations and the BfE-scenarios (marked in red). Top: HQ_{1000} , below: PMF

Ganglinie, dass nicht gleichzeitig Abflussspitze und Abflussvolumen maximiert werden dürfen, wie das bei den BfE-Szenarien teilweise der Fall ist.

4 Fazit

Im Rahmen des Projektes „Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat“ des Kantons Zürich soll der Sihlsee durch ein neues Wehrreglement besser für den Hochwasserschutz der Stadt Zürich genutzt werden. Für die Auslegung des Betriebs der Wehranlagen des Sihlsees wurden nun aktuelle Werte extremer Hochwasser unter Verwendung von historischen Niederschlagsereignissen, Abschätzung extremer Niederschläge und Niederschlag-Abfluss-Modellierung abgeschätzt.

Zur Bestimmung der extremen Hochwasser wurden in einem ersten Schritt Niederschläge mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren (P_{1000}) und der Probable Maximum Precipitation (PMP) abgeschätzt. Die P_{1000} -Werte wurden aus Gebietsniederschlagsstatistiken extrapoliert. Zur Festlegung der PMP-Werte für das Sihlsee-Einzugsgebiet wurde eine Umhüllende aus drei ausgewählten Methoden berechnet. Auf der Grundlage der berechneten P_{1000} - und PMP-Werte wurden Niederschlagsszenarien mit unterschiedlicher Dauer und unterschiedlichem zeitlichen Verlauf erarbeitet, welche dann verwendet wurden, um mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell PREVAH Ganglinien für extreme Hochwasser (HQ_{1000} , PMF) zu berechnen. Die Modellergebnisse wurden hinsichtlich ihrer Plausibilität mit beobachteten Extremhochwassern und mit den Ergebnissen aus SCHERRER AG (2013) verglichen. Die Abflussspitzen sind im Vergleich sehr hoch, was einerseits an der hohen Abflussbereitschaft des Sihlsee-Einzugsgebiets liegt und andererseits auch methodisch bedingt ist. Ein Vergleich der Abflussvolumen und der Abflussspitzen zeigte auf, dass die beiden Parameter nicht gleichzeitig maximiert werden dürfen. Die berechneten Ganglinien der größten Szenarien mit Abflussspitzen von 520–585 m^3/s (HQ_{1000} , Bemessungshochwasser) bzw. 900–975 m^3/s (PMF, Sicherheitshochwasser) und Abflussvolumen von 22–25 Mio. m^3 bzw. 40–43 Mio. m^3 werden als neue Grundlage zur Festlegung des

Wehrreglements vorgeschlagen (grau markierter Wertebereich in Abb. 8, bzw. Ganglinien in Abb. 9).

Es hat sich gezeigt, dass Berechnungen mit verschiedenen Niederschlagsszenarien wichtig sind, um getrennte Szenarien für die Abflussspitze und für das Abflussvolumen festlegen zu können. Die Anwendung verschiedener, v.a. physikalisch basierter Methoden und umfangreiche Plausibilitätsprüfungen der Niederschlags- und Abflusswerte waren hilfreich, um die Ergebnisse einzuordnen und plausible und robuste Werte bzw. Ganglinien zu erarbeiten.

Die angewandte Methodik ist keineswegs auf das Untersuchungsgebiet beschränkt. Eine hohe Güte der Ergebnisse ist aber davon abhängig, dass möglichst viele Grundlagendaten und ein möglichst physikalisch basiertes Niederschlag-Abfluss-Modell zur Verfügung stehen.

Conclusions

As part of the project "Flood protection along the Sihl and Limmat rivers and Lake Zurich" by the Canton of Zurich, the use of Lake Sihl for the flood protection of the city of Zurich is to be improved by means of a new weir regulation scheme.

To design the technical operation of the Lake Sihl weir system, current values of extreme floods were evaluated on the basis of historical precipitation events, the estimation of extreme precipitation and rainfall-runoff modelling.

To determine the extreme flooding, precipitation with a return period of 1,000 years (P_{1000}) and the Probable Maximum Precipitation (PMP) were estimated in a first step. The P_{1000} values were extrapolated from rainfall statistics of the area. To determine the PMP values for the Sihl catchment, an envelope of three selected methods was calculated. On the basis of the calculated P_{1000} and PMP values, precipitation scenarios with different durations and different time courses were developed, which were then used to

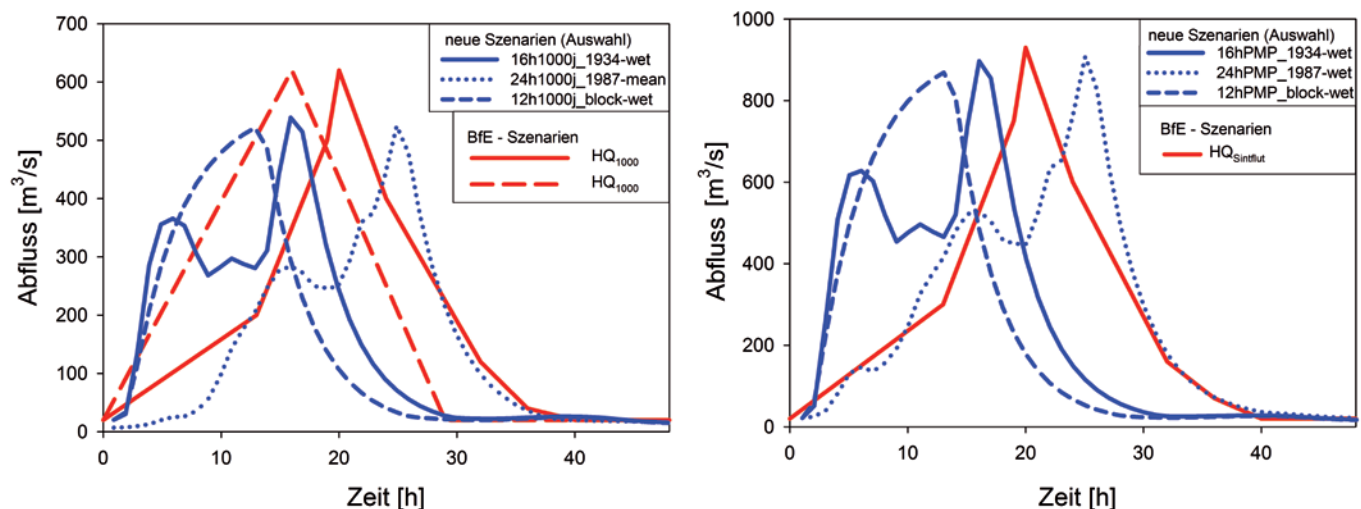


Abbildung 9

Vergleich der Zuflussganglinien (ETZELWERK AG 2002, BfE-Szenarien) mit den berechneten Zuflussganglinien aus der vorliegenden Studie (Auswahl, Erläuterung der Kürzel in Abschnitt 3.3.1 bzw. Tab. 2). Links: HQ_{1000} , rechts: PMF

Comparison of inflow hydrographs (ETZELWERK AG 2002, BfE-Szenarien) with the calculated inflow hydrographs of the present study (selection).

Left: HQ_{1000} , right: PMF

calculate hydrographs for extreme floods (HQ_{1000} , PMF) using the rainfall-runoff model PREVAH. In respect of their plausibility, the model results were compared with observed extreme floods and the results by SCHERRER AG (2013). The peak flows are very high in comparison, which is partly due to the high discharge readiness of the Sihl catchment, and partly due to methodological reasons. Precipitation-input in the rainfall-runoff model covered simultaneously the whole catchment area, which in reality is limited to a much smaller extent. A comparison of the discharge volume and the discharge peaks revealed that the two parameters should not be maximized at the same time. The calculated curves of the largest scenarios with peak discharges of 520–585 m³/s (HQ_{1000} , design flood) and 900 to 975 m³/s (PMF, security flood) and runoff volumes of 22–25 million m³ and 40–43 million m³, are proposed as a new basis for defining the regulation scheme (Figure 9).

It has been found that calculations based on different precipitation scenarios are essential for defining separate scenarios for peak discharge and runoff volume. Applying various, most notably physically-based methods and implementing extensive plausibility checks of precipitation and runoff values, has been helpful in assessing the results and establishing plausible and robust values and hydrographs.

Danksagung

Die Autoren danken dem Amt für Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich sowie der SBB AG für die finanzielle Unterstützung der Studie. Herzlichen Dank an zwei anonyme Reviewer, mithilfe deren Anmerkungen das Manuskript wesentlich verbessert werden konnte.

Anschriften der Verfasser:

Dr. P. Kienzler
Dr. D. Näf-Huber
Scherrer AG
Schöneggstrasse 8, 4153 Reinach, Schweiz
kienzler@scherrer-hydrol.ch
naef@scherrer-hydrol.ch

Dr. M. Zappa
N. Andres
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstr. 111, 8903 Birmensdorf, Schweiz
massimiliano.zappa@wsl.ch
norina.andres@wsl.ch

Literaturverzeichnis

- ADDOR, N., S. JAUN, F. FUNDEL & M. ZAPPA (2011): An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios. – *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (7), 2327–2347; DOI: 10.5194/hess-15-2327-2011
- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (1959): Glossary of Meteorology. – Boston, Massachusetts
- ASF (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von Schweizerischen Gewässern. – Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau, Bern
- BENITO, G. & V. R. THORNDYCRAFT (2005): Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences. – *Journal of Hydrology* 313 (1–2), 3–15; DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.002
- BÜCHNER, H. (1970): Ermittlung des maximal möglichen Regens auf statistischer Grundlage. – *WWT* 20 (10), 348–352
- BWG (2003): Hochwasserabschätzungen in schweizerischen Einzugsgebieten. – Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4. – Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
- CHOW, V.T., D.R. MAIDMENT & L.W. MAYS (1988): Applied Hydrology. – McGraw-Hill, New York, 570 S.
- DAOJIANG, Z. & Z. JINSHANG (1984): Recent developments of the probable maximum precipitation (PMP) estimation in China. – *Journal of Hydrology* 68 (1–4), 285–293
- DOUGLAS, E.M. & A.P. BARROS (2003): Probable maximum precipitation estimation using multifractals: Application in the eastern United States. – *Journal of Hydrometeorology* 4 (6), 1012–1024
- DVWK (1997): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. – DVWK-Mitteilungen 29. – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bonn
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Aufl. – Verlag für Bauwesen, Berlin
- ETZELWERK AG (2002): Stauanlagen Sihlsee, Notfallplan 2002. – Etzelwerk AG, Einsiedeln
- FREI, C. & C. SCHAR (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. – *International Journal of Climatology* 18 (8), 873–900
- GEIGER, H., J. ZELLER & G. RÖTHLISBERGER (1991): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Einführung, Methoden, Spezialstudien Band 7. – Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 334 S.
- GREBNER, D. & T. ROESCH (1998): Flächen-Mengen-Dauer-Beziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte in der Schweiz. – Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“, NFP 31. – vdf, Zürich
- GUILLLOT, P. & D. DUBAND (1967): La méthode GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. – *AISH publications* 84, 560–569
- GUPTA, H.V., H. KLING, K.K. YILMAZ & G.F. MARTINEZ (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. – *Journal of Hydrology* 377 (1–2), 80–91; DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- GURTZ, J., A. BALTENSWEILER & H. LANG (1999): Spatially distributed hydrotope based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. – *Hydrological Processes* 13, 2751–2768
- HANSEN, E.M. (1987): Probable Maximum Precipitation for Design Floods in the United-States. – *Journal of Hydrology* 96 (1–4), 267–278
- HARRIS, J. & G. BRUNNER (2011): Approximating the Probability of the Probable Maximum Flood. – *World Environmental and Water Resources Congress 2011*, 3695–3702; DOI: 10.1061/41173(414)387
- HERSHFIELD, D.M. (1961a): Estimating the probable maximum precipitation. – *Journal of Hydraulics Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 87, 99–106
- HERSHFIELD, D.M. (1961b): Rainfall Frequency Atlas of the United States. – Technical Paper No. 40. United States Department of Commerce, Washington DC. – Weather Bureau

- HERSHFIELD, D.M. (1965): Method for Estimating Probable Maximum Precipitation. – *Journal of the American Waterworks Association* 57, 965–972
- HERTIG, J.-A. & A. AUDOUARD (2005): Cartes des précipitations extrêmes pour la Suisse (PMP 2005) Rapport final. – EFLUM, EPFL
- ICOLD (1992): Selection of design flood, current methods. – *International Commission of Large Dams, ICOLD Bulletin* 82, Paris
- ISOTTA, F.A., C. FREI, V. WEILGUNI, M. PERČEC TADIĆ, P. LASSÈGUES, B. RUDOLF, V. PAVAN, C. CACCIAMANI, G. ANTOLINI, S.M. RATO, M. MUNARI, S. MICHELETTI, V. BONATI, C. LUSSANA, C. RONCHI, E. PANETTIERI, G. MARIGO & G. VERTAČNIK (2014): The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. – *International Journal of Climatology* 34 (5), 1657–1675; DOI: 10.1002/joc.3794
- KOUTSOYIANNIS, D. & A. LANGOUSIS (2011): Precipitation. – In: P. Wilderer & S. Uhlenbrook (Eds): *Treatise on Water Science* 2, 27–78. – Academic Press, Oxford
- LAWRENCE, D., E. PAQUET, J. GAILHARD & A.K. FLEIG (2014): Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall-snowmelt flood regimes. – *Natural Hazards and Earth System Science* 14 (5), 1283–1298; DOI: 10.5194/nhess-14-1283-2014
- METEOSCHWEIZ (2012): Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet der Sihl – Kurzbericht zum Auftrag von Scherrer AG Hydrologie und Hochwasserschutz
- NASH, J.E. & J.V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. – *Journal of Hydrology* 10, 282–290
- NAEF, F., D. GREBNER, S. SCHERRER & K. SIEROTZKI (1998): Extreme Floods of the Cuncumen River – Hydrometeorological Study of the Quillayes Tailings Dam. – IHW Report Nr. 018, Zürich
- RAKHECHA, P.R. & M.R. KENNEDY (1985): A Generalized Technique for the Estimation of Probable Maximum Precipitation in India. – *Journal of Hydrology* 78 (3–4), 345–359
- REISS, R.-D. & M. THOMAS (2007): *Statistical Analysis of Extreme Values with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields*. 3rd ed. – Birkhäuser Verlag, Basel, 511 S.
- REZACOVA, D., P. PESICE & Z. SOKOL (2005): An estimation of the probable maximum precipitation for river basins in the Czech Republic. – *Atmospheric Research* 77 (1–4), 407–421
- SAG (2010): Scherrer AG: PMP- / PMF-Vorstudie an der Aare in Beznau. Auftraggeber: RESUN AG, Aarau. – Bericht 10/120
- SAG (2012): Scherrer AG: Abschätzung der Grösse extremer Hochwasser (HQ₁₀₀₀, PMF) der Eulach und des Riedbachs im Zusammenhang mit dem Hochwasserrückhalteraum Hegmatten. – Bericht 12/168
- SCHERRER AG (2013): Hochwasser-Hydrologie der Sihl. – Bericht 12/159, Juli 2013
- SCHWANBECK, J., D. VIVIROLI, R. WEINGARTNER, I. RÖSER & J. TROSCHE (2007): Prozessbasierte Abschätzung von Extremhochwassern im Einzugsgebiet der Sihl. Schlussbericht. – Im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich. Geographisches Institut der Universität Zürich, TK Consult AG
- SPREAFICO, M. & K. STADLER (1988): Hochwasserabflüsse in Schweizerischen Gewässern. – *Mitteilung der Landeshydrologie* Nr. 8, Bern
- STRELE, G. (1934): *Grundriss der Wildbachverbauung*. – Springer, Wien
- TK CONSULT (2013): Hydrodynamische Modellrechnungen Sihlsee/Sihl. Im Rahmen des Projekts „Langfristiger Hochwasserschutz Sihl, TP2“. – Im Auftrag des AWEL, Kt. ZH
- VERWORN, H.-R. & U. KUMMER (2006): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Abschlussbericht. – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover
- VISCHER, D. (1980): Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss. – *Schweizer Ingenieur und Architekt. Schweizerische Bauzeitung* 98 (40), 981–984
- VIVIROLI, D., H. MITTELBACH, J. GURTZ & R. WEINGARTNER (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. & R. WEINGARTNER (2011): Umfassende hochwasserhydrologische Beurteilung ungemessener mesoskaliger Einzugsgebiete im schweizerischen Rheineinzugsgebiet durch prozessorientierte Modellierung. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55 (5), 258–272
- VIVIROLI, D., M. ZAPPA, J. GURTZ & R. WEINGARTNER (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., M. ZAPPA, J. SCHWANBECK, J. GURTZ & R. WEINGARTNER (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
- WANG, B.H. (1984): Estimation of Probable Maximum Precipitation – Case Studies. – *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 110 (10), 1457–1472
- WEIBULL, W. (1939): *A statistical theory of strength of materials*. – Ing. Vet. Ak. Handl., Stockholm, 151 S.
- WEINGARTNER, R. & H. ASCHWANDEN (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. – *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2*. – Bundesamt für Umwelt, Bern
- WEISS, L.L. (1964): Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall. – *Journal of the Hydraulics Division* 90 (1), 77–82
- WMO (2009): *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. – WMO-No. 1045, Genf
- WSL (2014): Hochwassersteuerung Sihlsee: Modellierung von Hochwasserszenarien für die Sihl und Steuerungsszenarien für den Sihlsee. – Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf
- WUNDT, W. (1965): Grenzwerte der Hochwasserspende und der mittleren Abflusspende in Abhängigkeit von der Fläche. – *Die Wasserwirtschaft* 55 (1), 1–5
- ZAPPA, M., S. JAUN, A. BADOUX, J. SCHWANBECK, N. ADDOR, K. LIECHTI, I. ROESER, A. WALSER, D. VIVIROLI, S. VOGT, M. GERBER, J. TRÖSCH, R. WEINGARTNER, M. OPLATKA, GR. BEZZOLA & J. RHYNER (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. – *Wasser, Energie, Luft* 3, 238–248