

# Hochwasserschutz Zürich – Seestände und Abfluss

Daniel Näf-Huber, Simon Scherrer, Oliver Wetter, Thomas Specker, Matthias Oplatka, Natascha Eisenhut

## Zusammenfassung

Die weit zurückreichenden Seespiegel- und Abflussdaten an Zürichsee und Limmat erlauben eine aussagekräftige Hochwasserstatistik (rund 200 Jahre). Dank der historischen Untersuchung konnte der überblickbare Zeitabschnitt auf mehr als 650 Jahre erweitert werden. Aufgrund der fluss- und wasserbaulichen Eingriffe im Limmat-Einzugsgebiet sind die Messdaten jedoch inhomogen, weil die Hochwasser unter anderen Verhältnissen abliefen. Für grosse See-Hochwasser mit ausreichend vorhandenen Daten (1817, 1821, 1824, 1846, 1876, 1910 und 1953) wurde versucht, den Verlauf des Zürichseespiegels und der Limmat mit und ohne Sihl unter heutigen Randbedingungen zu simulieren. Die Homogenisierung der Messreihe von 1811–2013 gelang, für noch ältere Hochwasser war dies unmöglich. Trotzdem können wesentliche Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen gezogen werden: Die häufigen Hochwasser werden anhand der kurzen Messreihe seit dem Bau der Zürichseeregulierung (1943–1951) unterschätzt, die seltenen Hochwasser sind plausibel. Beim Hochwasser 1817 wäre der Zürichsee unter heutigen Bedingungen auf 407.07 m ü. M. angestiegen (Rang 1), gefolgt von den Hochwasser 1910 und 1999 (407.01 m ü. M.), wobei letzteres das grösste Ereignis seit der Seeregulierung ist.

## Hydrologisch-hydraulischen Untersuchungen

In den vergangenen Jahren wurden viele Aspekte zum Hochwasserschutz von Zürich untersucht, neben dem Hochwasservorhersagesystem IFKIS Hydro Sihl (Zappa et al., 2010; Badoux et al., 2010), sind insbesondere Themen zum Komplex Risikoanalysen, Risikomanagement und Gefahrenkarte der Stadt näher betrachtet worden (Scapozza et al., 2013; Maidl et al., 2013; Dolf et al., 2014; Detert und Schatzmann, 2014), die Zürichsee-Höchststände waren dabei aber kein Thema.

## 1. Einleitung

Bei mehreren Hochwassern im Mittelalter stieg der Zürichsee so hoch an, dass mit Schiffen durch die Gassen der Stadt Zürich beidseits der Limmat gefahren werden konnte, teilweise sogar bis zur Fraumünsterkirche. Im Vergleich zu heute lagen im 16. Jh. die höchsten Seestände rund 2 m höher als beim Hochwasser 1999! Dieses Wissen ging in den letzten Jahren etwas vergessen, erhielt aber nach dem Hochwasser 2005 wieder neue Aufmerksamkeit.

2005 stiegen die Pegel der Sihl bedrohlich an. Die Fachleute fragten sich, was wohl geschehen wäre, wenn ein vergleichbares Niederschlagsereignis wie 2005 nicht in der Innerschweiz, sondern im Einzugsgebiet von Sihl stattgefunden hätte (Denzler, 2011). Um Zürich vor Hochwasser zu schützen, wurden nach weitgehenden hydrologisch-hydraulischen Untersuchungen (siehe Kasten) im Zusammenhang mit der Überleitung von Hochwasserspitzen der Sihl in den Zürichsee, der Fokus auch auf die Höchststände des Zürichsees und der Seeausflüsse gelegt.

Zur Klärung der Frage, ob heute solche Zürichseestände noch auftreten können, hat das AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kt. Zürich) eine Studie zur Erkundung und Einordnung historischer Hochwasser an der Limmat lanciert (Scherrer

AG, 2015; Wetter und Specker, 2015). Im vorliegenden Artikel werden folgenden Punkte beleuchtet:

- Welche Veränderungen im Einzugsgebiet (EZG) und in der Stadt Zürich haben den Seestand und den Ausfluss aus dem See massgeblich beeinflusst und sind Seehöchststände wie im Mittelalter heute überhaupt noch zu erwarten?
- Am Zürichsee werden seit 1811 die Seespiegel registriert (Datenlücke 1881–1891). Die Zürichseeausflüsse werden nicht gemessen. Sind weitere Messdaten vorhanden?
- Wie weit zurück in die vorinstrumentelle Zeit (vor 1811) können historische Seestände rekonstruiert werden?

## 2. Historische Systemveränderungen

### 2.1 Veränderungen im EZG

Das Einzugsgebiet (EZG) des Zürichsees in Zürich umfasst 1829 km<sup>2</sup> (Bild 1), rund 600 km<sup>2</sup> davon fliessen seit der Linthkorrektur (1808–1816) über den Walensee dem Zürichsee zu. Der Walensee mit einer Seefläche von 24.1 km<sup>2</sup> hat ein EZG von 1061 km<sup>2</sup>. Der Zürichsee inkl. Obersee hat eine Fläche von 88.2 km<sup>2</sup>. Nur wenig unterhalb des Seeausflusses mitten in der Stadt

Zürich mündet die Sihl mit 336 km<sup>2</sup> in die Limmat.

Vor der Linthkorrektur floss die Linth von Näfels ohne Umweg über den Walensee via Ziegelbrücke in den Obersee. Der Obersee reichte im Mittelalter noch weit in die Ebene hinein und bildete den Tuggennersee, der 1550 endgültig verlandete. Mit der Linthkorrektur wurde die Linth in den Walensee geleitet und die Linth zwischen Walensee und Obersee kanalisiert (Vischer, 2003). Mit der Umleitung der Linth wurden die Abflussspitzen grosser Linthhochwasser im Walensee und auf den Überflutungsflächen in der Linthebene stark gedämpft.

Zusätzlich dürften die heute im EZG befindlichen Stauseen (in Klammern Jahr der Inbetriebnahme, Seefläche und EZG-Fläche): Limmernsee (1963, 1.3 km<sup>2</sup>, 17.8 km<sup>2</sup>), Klöntalersee (1910, 3.2 km<sup>2</sup>, 82.8 km<sup>2</sup>), Wägitalersee (1924, 4.2 km<sup>2</sup>, 42.7 km<sup>2</sup>), Sihlsee (1937, 10.7 km<sup>2</sup>, 156 km<sup>2</sup>) einen dämpfenden Einfluss ausüben.

### 2.2 Veränderungen in Zürich

Bild 2 zeigt die wesentlichen Messstellen, Brücken und sonstigen wichtigen Standorte im Raum Zürich auf dem aktuellen Stadtplan als Anhaltspunkte.

Die erwähnten flussbaulichen Veränderungen im EZG zwischen 1200 und heute veränderten auch das Abflussverhalten der Limmat in der Stadt Zürich. Diesen Veränderungen des Zu- und Abflussverhaltens

gilt es bei der Interpretation der rekonstruierten Scheitelwasserstände Rechnung zu tragen. Es wurde versucht, die zahlreichen flussbaulichen Veränderungen im und ausserhalb des direkten Untersuchungsgebietes in einer semi-quantitativen Weise zu berücksichtigen. Die «Quantifizierung» der Veränderung der Abflussverhältnisse wurde durch eine 12-stufige Bewertungsskala vorgenommen, wobei -6 für eine sehr starke, -1 für eine sehr geringe Abflussverschlechterung bzw. +1 für eine sehr geringe und +6 für eine sehr starke Abflussverbesserung stehen (Bild 3). Die Grafik zeigt, dass sich die Abflussverhältnisse ab dem 13. bis Anfang 19. Jahrhundert, zwar nur sehr schwach, dafür aber kontinuierlich verschlechterten. Mit dem Bau resp. Umbau von Brücken und Mühlen wurden wiederholt die Ufermauern an unterschiedlichen Orten ins Abflussprofil verschoben (1371, 1395, 1535, 1553, 1593–95, 1620) und in der Mitte des 16. Jh. wurde unterhalb des Rathauses (2 in Bild 2) die Schlachthalle über der Limmat errichtet. Viele Änderungen betrafen auch den Bereich zwischen See und Münsterbrücke (a bis 1 in Bild 2), 1642–1677 wurde der Schanzengraben als Teil der Stadtbefestigung (II in Bild 2) erstellt. 1862 wurde die Mündung des Schanzengraben von der Limmat in die Sihl verlegt. Erst die Linthkorrektion Anfang des 19. Jh. und die Veränderungen in der 2. Hälfte des 20. Jh. brachten auf einen Schlag grosse Verbesserungen. Ebenfalls eingetragen sind die rekonstruierten Hochwasserstände.

Im 19. Jh. wurde zunehmend erkannt, dass Hindernisse in der Limmat den

Seeausfluss hemmen. Deshalb wurden sie fortan beseitigt und weitere abflussfördernde Massnahmen ergriffen. 1835 beispielsweise wurde das Pumpwerk (A), die Palisaden (B) und das Grendelgebäude (C) entfernt und die alte Münsterbrücke (1 in Bild 2) mit weniger Pfeilern neu gebaut. Auch der Wellenbergerturm (D) wurde abgetragen und das Flussbett vertieft. 1842 bis 1846 wurden dann fünf Freischleusen am oberen Mühlestieg (3) erstellt und das Durchflussprofil verbreitert. 1846–1856 erfolgten verschiedene Gerinneerweiterungen am oberen Mühlestieg (3), 1862 wurde die Mündung des Schanzengraben vom unteren Mühlestieg zur Sihl verlegt. 1865 entschloss man sich zur Aufhebung des Fröschengraben (I) als Seeausflussgerinne. 1861 wurde die Bahnhofbrücke (5) erstellt. Gegen Ende des 19. Jh. wurden verschiedene weitere Wehre und Mühlen beseitigt und mit dem Umbau der Rathausbrücke (2) das Gerinne vertieft.

Mit der Seeregulierung in den Jahren 1943 bis 1951 wurden die Seespiegelschwankungen auf die Koten zwischen 405.45 und 406.15 m ü. M. begrenzt. Im Hochwasserfall darf der Abfluss der Limmat in Zürich-Unterhard 600 m<sup>3</sup>/s nicht überschreiten. Bei Hochwasser der Sihl muss dann der Zürichseeausfluss entsprechend gedrosselt werden. Beim Platzspitz, unmittelbar unterhalb des früheren Nadelwehrs, wurden zwei Dachwehre mit einer bewegliche Stauhöhe von 4.60 m errichtet. Direkt daneben kann mit einem weiteren Dachwehr der Oberwasserkanal des Limmatkraftwerks Letten verschlossen werden. Die Haupthindernisse in der Limmat wurden



Bild 1. EZG des Zürichsees mit Veränderungen Linthkorrektion.

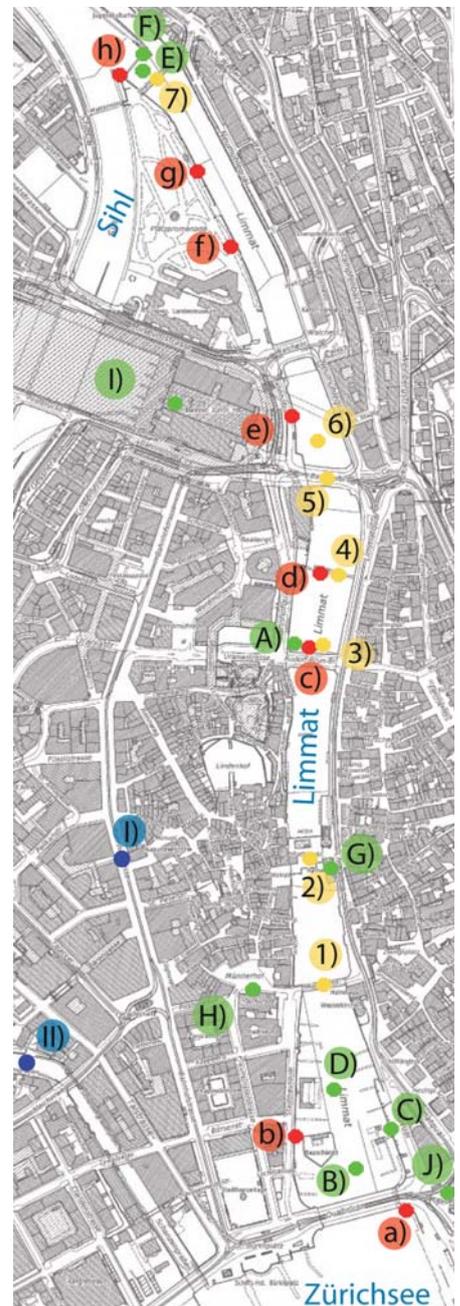
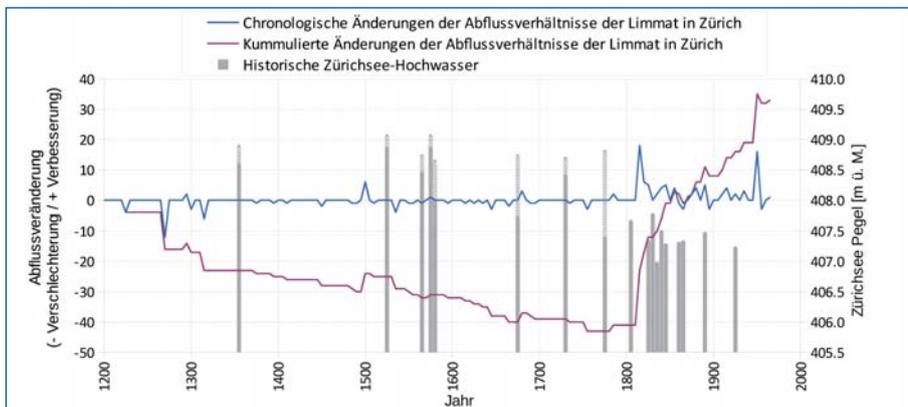
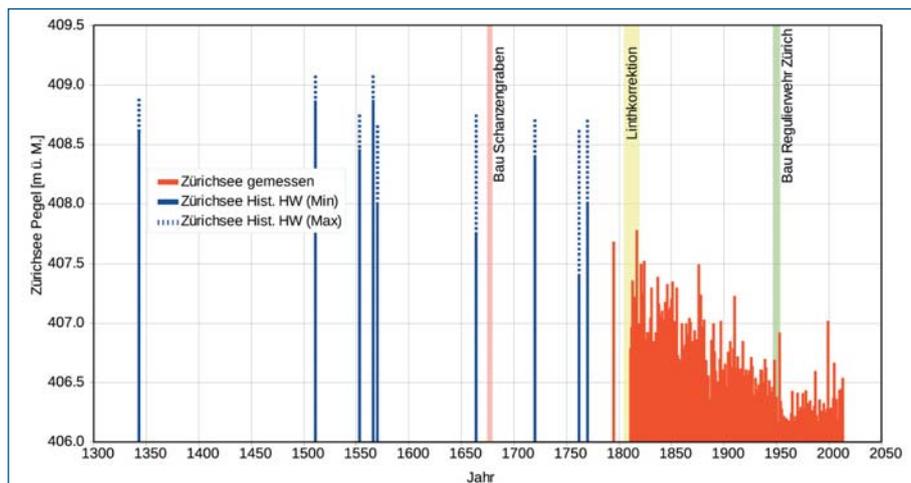


Bild 2. Stadt Zürich mit den Pegeln, Brücken und wesentlichen Punkten entlang der Limmat. Pegel (rot): a) Zürichsee – Zürich, Quaibrücke; b) Stadthaus (Bau schänzli); c) Oberer Mühlestieg; d) Unterer Mühlestieg; e) Papierer Werd, unter dem langen Steg; f) Platzpromenade, Schlachthaus; g) Mitte Platz (promenade), Mitte Schützenplatz; h) Platzspitz. Gewässer (blau): I) ehem. Fröschengraben; II) Schanzengraben. Brücken (gelb): 1) Münsterbrücke; 2) Rathausbrücke (Gemüsebrücke); 3) Oberer Mühlestieg (Obersteg), Rudolf-Brun-Brücke; 4) Unterer Mühlestieg (Untersteg); 5) Bahnhofbrücke; 6) Langer Steg; 7) Drahtschmidlisteg. Sonstiges (grün): A) Pumpwerk; B) Palisaden; C) Grendeltor, -gebäude; D) Wellenbergerturm; E) Nadelwehr; F) Regulierwehr Zürich; G) Rathaus; H) Fraumünster mit Münsterplatz/ -hof; I) Hauptbahnhof; J) Bellevue.



**Bild 3. Bewertung der flussbaulichen Veränderungen der Zu- und Abflussverhältnisse der Limmat: +/- 1 keine bis kaum verschlechterte (-) / verbesserte (+) Zu- bzw. Abflusswirkung +/- 6 sehr stark verschlechterte (-) / verbesserte (+) Zu- bzw. Abflusswirkung.**



**Bild 4. Jahreshöchststände am Zürichsee und historische Systemveränderungen.**

abgebrochen. Dies umfasste drei Gebäude am oberen Mühlesteig, sowie vier Gebäude am unteren Mühlesteig. Zusätzlich wurde die Limmatsohle zwischen der Rudolf-Brunbrücke und der Bahnhofbrücke 0.5 bis 1.0 m vertieft. Der Aufstau der Limmat hatte zur Folge, dass auch die Ufermauern in den entsprechenden Abschnitten angepasst werden mussten.

### 3. Erste Zürichseespiegel um 1340

#### 3.1 Einleitung

Auf der Homepage des BAFU ist der jeweils höchste Seestände jedes Monats für die Periode seit 1951 einsehbar. Auf Anfrage liefert das BAFU digital die Jahreshöchststände zurück bis 1811. In früheren Jahrbüchern (z. B. 1906) sind aussergewöhnliche Höchststände verzeichnet, für den Zürichsee beispielsweise der Stand vom Hochwasser 1762. Weitergehende Recherchen in Archiven und gedruckten Quellen sind aufwendig, aber für die Situation in Zürich erfolgversprechend.

#### 3.2 Rekonstruierte Seestände

Vor dem 18. Jh. sind Hochwasserereignisse nur gelegentlich in Quellen überliefert. Trotz der darin enthaltenen Unschärfen wurde der Versuch unternommen, daraus möglichst genaue Scheitelwerte zu rekonstruieren.

Die historischen Beschreibungen geben oft zur Veranschaulichung des Hochwasserstandes die höchsten resp. äussersten überschwemmten Stellen an, wobei häufig die gleichen Orte genannt werden. Es bot sich daher an, häufiger genannte Überschwemmungsorte nach ihrer Höhe zu rekonstruieren und so von der Lage auf die Höhe des Wasserspiegels zu schliessen. Bullinger berichtet in seinem Diarium vom April 1566:

«Das kornhuss (vor dem Fraumünster gelegen und 1897 abgebrochen) stand im wasser, uns was bidem Weggen und zum Schwert (beide am linken Limmatufer bei der Rathausbrücke) gestäget. Das wasser luff für den Kämbel (am Münsterplatz gelegen) uff halben Münsterplatz hinab, gieng an das werchhuss, luff in krützgang zum Frowen münster, und an der oberen bruggen gägen Frowen münster mocht man es von der bruggen erlangen.»

Für die Limmat erwies sich das

hochwasserexponiert gelegene Fraumünsterareal mit Kirche, Kreuzgang und Münsterhofplatz als günstiger Referenzpunkt. Die im Laufe der Jahrhunderte durch Nutzung, Neu- und Ausbauten veränderten Bodenniveaus dieser Teile liessen sich ausreichend genau rekonstruieren.

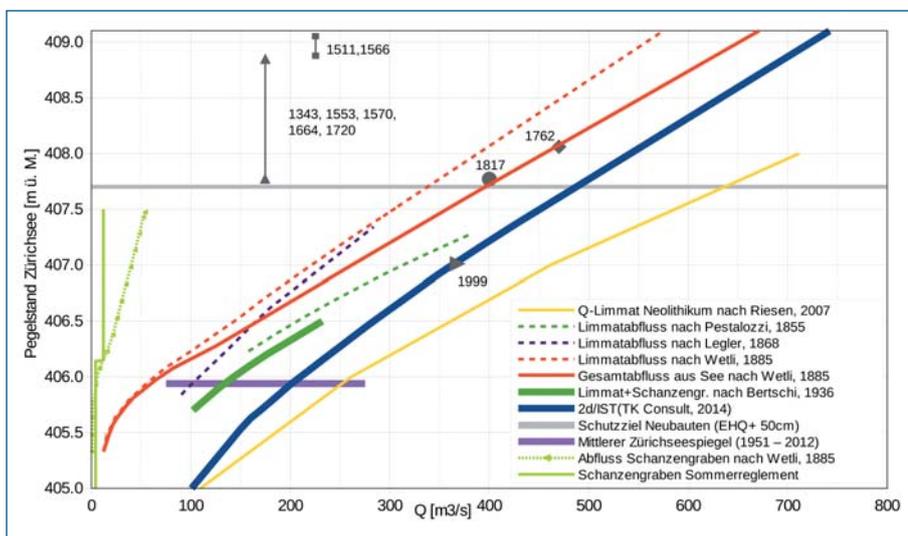
Die sieben rekonstruierten maximalen Zürichsee-Höchststände datieren zurück bis ins Jahr 1343. Die beiden grössten bekannten Zürichsee-Höchststände ereigneten sich 1511 und 1566. und lagen nochmals ca. einen halben Meter höher als derjenige von 1762. Der Bau des Schanzengrabens in den 1670er Jahren (Bild 4) hatte keinen massgeblichen Einfluss auf die maximalen Seestände der historischen Hochwasser.

#### 3.3 Gemessene Seestände

Die Jahreshöchststände des Zürichsees liegen mit zusätzlichen Informationen zu den Pegeln seit 1811 vor (BAFU, 2014). Seit 1866 sind tägliche Pegelstände von Zürichsee und Limmat archiviert, sowie aussergewöhnliche Höchststände konnte auch für die Zeit vor den regelmässigen Messungen gefunden werden. Eine sehr umfangreiche, bisher unbekannte Dokumentation der Seestände und der Limmatpegel bis zur Sihlmündung wurde im Archiv des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) gefunden. Das besondere sind die ab 1845 vorliegenden täglichen Messungen an 7 Messstellen (siehe auch Bild 2, b bis h), Infos zu den Schleusen und zum Stand der Sihl.

Bild 4 zeigt sämtliche nun bekannten Jahreshöchststände am Zürichsee. Rot eingetragen ist die 200-jährige Messreihe, blau die rekonstruierten historischen Hochwasser, sowie rosa der Bau des Schanzengrabens, gelb die Linthkorrektur und in grün der Bau des Regulierwehrs und damit die wesentlichsten Änderungen im System. Zum Vergleich liegt heute der mittlere Seespiegel des Zürichsees bei 405.95 m ü. M. und die Haltestelle am Zürcher Bellevue auf 408.51 m ü. M.

Die grössten gemessenen Höchststände des Zürichsees datieren aus den Jahren 1762 (408.06 m ü. M.) und kurz nach dem Abschluss der Linthkorrektur 1817 (407.77 m ü. M.). Zum letzten Mal auf beinahe 407.5 m ü. M stieg der Zürichsee am 15.6.1876. In dieselbe Zeit fallen auch verschiedene Massnahmen zur Verbesserung der Abflussverhältnisse aus dem Zürichsee. Bis 1866 der letzte Abschnitt der Linth (Ausbau zwischen Grinau und Obersee) korrigiert wurde, ereigneten sich noch etliche See-Hochwasser (1821, 1824, 1831,



**Bild 5. Pegel-Ausflussbeziehung (Pegelstand Zürichsee zu Limmatabfluss) nach verschiedenen Autoren, sowie historische Seestände.**

	Ohne hist. Hochwasser (Ist-Zustand)	Mit hist. Hochwasser (vorgeschlagen)
EHQ	407.35	407.35
HQ300	407.20	407.20
HQ100	406.95	406.95 – 407.10
HQ30	406.70	406.80 – 406.95

**Tabelle 1. See-Hochwasserstände des Zürichsees [m ü. M.] unterschiedlicher Jährlichkeit ohne und mit Berücksichtigung der historischen Hochwasser.**

1837, 1846, 1851, 1855), welche alle grösser waren als die grössten im 20. Jh.: 1910 (407.22 m ü. M.), 1953 (406.91 m ü. M.) und 1999 (407.01 m ü. M.).

Einen deutlichen Einfluss hatte also die Umleitung der Linth in den Walensee. So konnten die höchsten Zürichseestände um rund einen Meter gesenkt werden. Eine weitere Reduktion um rund einen halben Meter konnte mit der Zürichseeregulierung und der damit verbunden Erhöhung der Ausflusskapazität erzielt werden (siehe Kap. 4).

#### 4. Seeausflüsse

Zur Klärung der Frage, ob solche hohe Seestände wie im Mittelalter heute immer noch möglich sind, wurden die Beziehungen zwischen Seestand und Abfluss (PQ-Beziehung) in der Limmat und im Schanzengraben zusammengetragen.

Im Bereich der heutigen Stadt Zürich verlagerte sich der Lauf der Sihl auf dem Schuttkegel immer wieder, ursprünglich floss sie westlich des Giesshübels (vom Hauptbahnhof ca. 2 km sihlaufwärts) vorbei. Bereits vor dem Neolithikum wandte sich ihr Lauf gegen den Hauptbahnhof hin und pendelte später zwischen Hauptbahnhof und Zürichsee (Schindler, 1971). Die damit verbundenen Ablagerungen beeinflussten den

Stand des Zürichsees. Seit ungefähr 1000 n. Chr. mündet die Sihl in der Nähe des Hauptbahnhofs in die Limmat.

Die Rekonstruktion der PQ-Beziehung von Riesen (2007) für das Neolithikums (ca. 5500–2500 v. Chr.) basierend auf diversen Arbeiten von Schindler ergibt bei einem Zürichseespiegel von 406 m ü. M. eine sehr grosse Abflusskapazität der Limmat von rund 250 m³/s (Bild 5).

Anthropogene Einflüsse beginnen bereits mit den Römern, aber erst im Mittelalter wirken sich die Veränderungen der Abflusskapazitäten markant aus. Rekonstruktionsversuche für die Zeit vor dem 19. Jh. scheiterten, da die dazu notwendigen genauen Grundlagen fehlen, so stammt das älteste Querprofil an der Limmat aus dem Jahr 1834 (Wetter und Specker, 2015).

In der Mitte des 19. Jh. wurde die Problematik der Einbauten in der Limmat erst richtig erkannt und erste Abflussmessungen vorgenommen. Pestalozzi (1855) schätzte die Abflusskapazität gar optimistisch ein (Bild 5). Legler (1868) vermutete Messfehler bei Pestalozzi. Legler (1868) und Wetli (1885) gehen bei höheren Wasserständen von ähnlichen Abflüssen aus, bei niedrigen Wasserstand (406 m ü. M.) gehen ihre Einschätzungen stark auseinander.

Von Wetli sind auch Seestand-Abflussbeziehungen im Schanzengraben vorhanden. Für Seestände unterhalb von 406.2 m ü. M. stimmen die Abflüsse gut mit dem heutigen Sommerreglement überein (4, resp. 10 m³/s unter resp. über einem Seestand von 406.15 m ü. M.) bei einem Hochwasser wie 1876 (Seestand von rund 407.5 m ü. M.) sind nach Wetli (1885) aber Abflüsse aus dem Schanzengraben von 50 m³/s möglich. Für den Seeausfluss spielt der Schanzengraben eine kleine Rolle.

Für die noch höheren Seestände der Hochwasser 1762 und 1817 wurde Wetli's Seestand-Abflussbeziehung durch die Scherrer AG linear extrapoliert. Damit erhält man für das Hochwassers 1762 bei einem Seestand von 408.07 m ü. M. eine gesamte Seeausflussspitze von ca. 470 m³/s und für das Hochwasser 1817 rund 400 m³/s, was sich mit den Angaben von Legler (1868) deckt. Die Abflüsse werden mit der linearen Extrapolation tendenziell eher unterschätzt, da die Querprofile sich beim Ausufernd eher vergrössern und die Abflüsse überproportional zunehmen.

Mit dem Entfernen von verschiedenen Hindernissen in der Limmat verdoppelte sich die Abflusskapazität zwischen der Mitte des 19. Jh. und den 1930er-Jahren bei einem Seestand von 406 m ü. M. von 70 m³/s auf 140 m³/s (Bild 5, Vergleich Legler/Bärtschi). Mit der Realisierung des Regulierwehrs 1951 und weiteren abflussfördernden Massnahmen konnte der Abfluss bei gleichem Seestand nochmals um 70 m³/s auf heute über 200 m³/s erhöht werden, dies entspricht einer Verdreifachung! Die höhere Abflusskapazität entschärft also die Situation gegenüber dem 19. Jh. (und früher) entscheidend. Die 2d-Simulationen für den heutigen Ist-Zustand von TK Consult (2014) bestätigen die in den 1930er-Jahren für das Projekt vorhergesagten Abflüsse.

Zur besseren Übersicht über die Verhältnisse des Zürichseespiegels sind die durch Wetter und Specker (2014) rekonstruierten höchsten Zürichseestände von 1511 und 1566 und der Bereich weiterer hoher Zürichseestände in den Jahren 1343, 1553, 1570, 1664 und 1720 ebenfalls dargestellt worden (Bild 5). Zum Vergleich ist der Seestand des Hochwassers 1999 eingetragen, dem grössten der letzten 60 Jahre. Ergänzend ist das Schutzziel für Neubauten (EHQ plus 50 cm) eingetragen (AWEL, 2014).

#### 5. Wie ordnen sich die Hochwasser ein?

Am Zürichsee liegt nun bezüglich Seehochwasser ein überblickbarer Zeitraum von 650 Jahren vor. Allerdings hat es in dieser Zeitspanne grosse Veränderungen im EZG und beim Seeausfluss gegeben, welche die Vergleichbarkeit der Hochwasser erschwert. Aufgrund dieser Inhomogenitäten stellt sich die Frage, welche Informationen trotzdem für eine statische Einordnung der Hochwasser genutzt werden kann.

Es gab aber Perioden, die in sich einigermaßen homogen waren, so 1343–1810 (468 Jahre vor der Umleitung der Linth in den Walensee), 1811–1880 (70 Jahre zwischen Linth-Korrektion und Umbau Rat-

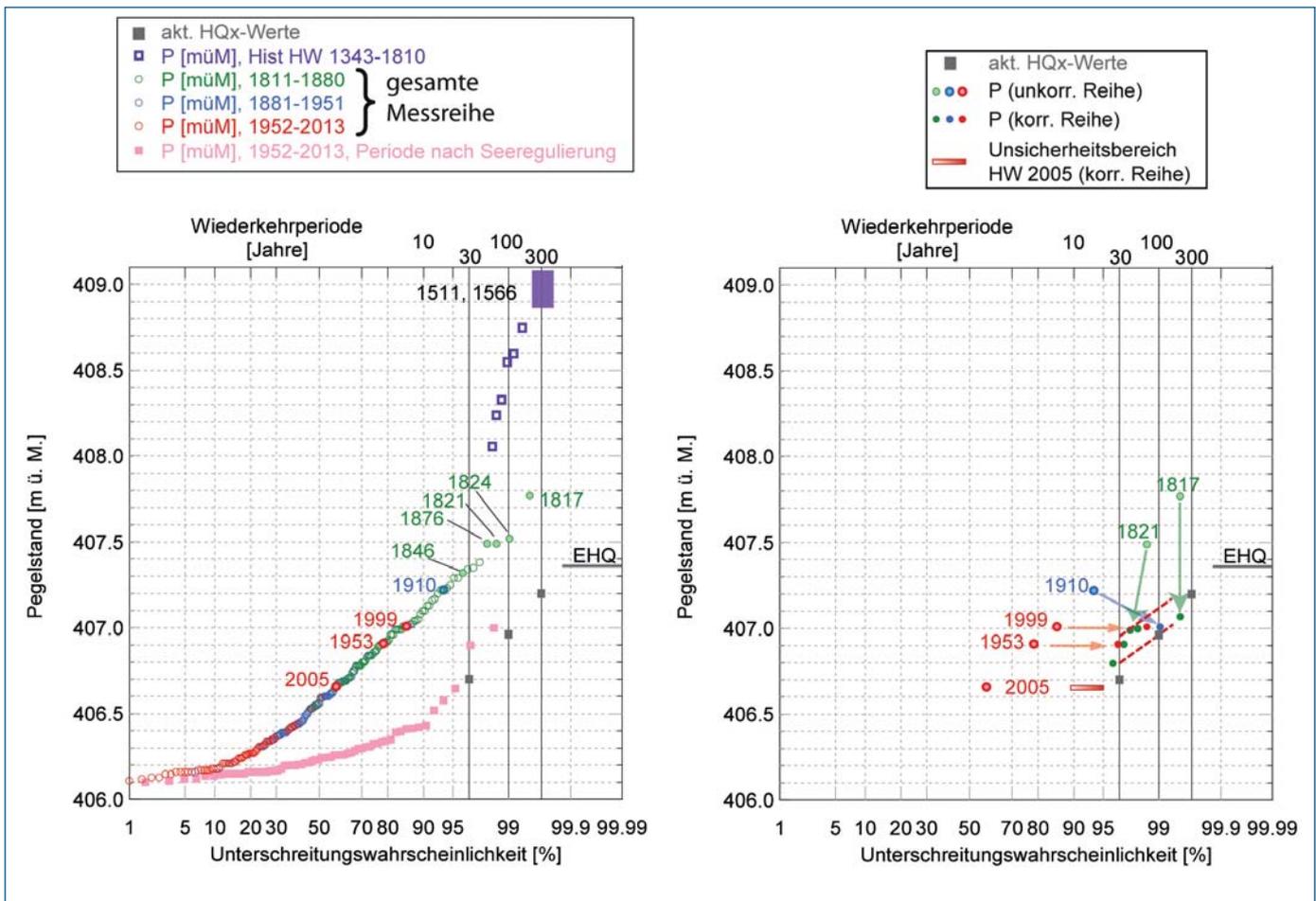


Bild 6. Frequenzdiagramm Zürichsee inkl. historische Hochwasser, links unkorrigierte Reihe, rechts korrigierte Reihe.

hausbrücke / Vertiefung des Flussbetts unter der Brücke), 1881–1951 (71 Jahre zwischen Umbau Rathausbrücke und Inbetriebnahme Regulierwehr) und 1952–2013 (62 Jahre nach der Inbetriebnahme des Regulierwehrs an der Limmat oberhalb der Sihlmündung). Die ältesten und zugleich höchsten Seestände wurden eingeordnet und sind in Bild 6a als violette Kästchen eingetragen. Die Perioden 1811–1880, 1881–1951 und 1952–2013 wurden zu einer inhomogenen Periode zusammengefasst (blaue, grüne und rote Kreise). Die Periode nach der Seeregulierung 1952–2013 wurde zusätzlich separat ausgewertet (rosa Quadrate). Ebenfalls eingetragen sind die heute aktuellen Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit.

Ungeklärt ist aber die Frage, ob die grossen historischen Hochwasser im Mittelalter nur wegen den beschränkten Abflussverhältnissen zu derart hohen Seeständen führten oder ob es sich dabei tatsächlich um aussergewöhnlich grosse Ereignisse handelte. Von den mittelalterlichen Rekonstruktionen liegen leider nur die Höchststände vor. Seit 1811 sind hingegen mindestens Tageswerte der Seespiegelmessungen verfügbar. Legler (1869) und Wetli (1885) ermittelten damit den Seezufluss für die Hochwasser 1817, 1846 und 1876. Für

die Hochwasser 1910 und 1953 standen neben den Tageswerten auch höher aufgelöste Werte zur Verfügung.

Aus den Zuflussganglinien berechnete TK Consult für die historischen Hochwasser von 1817, 1846, 1876, 1910 und 1953 den Seeausfluss unter heutigen Abflussbedingungen (höhere See-Ausflusskapazität). Damit kann eine Homogenisierung der Daten vorgenommen werden und gezeigt werden, mit welchen Seeständen und Abflussspitzen in Zürich-Unterhard (inkl. Sihl) bei heutigen Verhältnissen zu rechnen ist.

Für die Berechnungen wurden entweder

- die Seespiegeldaten gemäss den historischen Messungen vorgegeben, d. h. die historischen Ganglinien des Zürichseestands bilden die Randbedingungen für die Modellierung. Daraus werden unter den heutigen Abflussbedingungen der Zürichseezufluss und -ausfluss zurück berechnet
- oder
- die nach Legler (1868a) resp. Wetli (1885) berechneten Zuflüsse zum Zürichsee wurden vorgegeben und der Zürichseestand, resp. der Ausfluss aus dem Zürichsee unter heutigen Bedingungen wurden berechnet. Zusätzlich zu diesen

Randbedingungen müssen Annahmen zum Abfluss der Sihl getroffen werden. Bei den neueren Ereignissen sind die Ganglinien der Sihl bekannt und für die älteren Ereignisse mussten Annahmen getroffen werden. Da die Höchststände der Sihl meist vor den Zürichseehöchstständen eintreten, sind diese Annahmen nur bei mehrgipfligen Ereignissen von grösserem Einfluss, wie 1846 oder 1999 als sich zwei Hochwasserereignisse im Abstand von wenigen Tagen wiederholten.

Bild 6b zeigt, die Veränderung der Seehochstände der Hochwasser von 1817 und 1821 unter heutigen Bedingungen: Das Hochwasser 1821 wäre heute 0.5 m weniger hoch, dasjenige von 1817 sogar 0.7 m! Für die 200jährige Reihe wurden die grössten Hochwasser im Frequenzdiagramm eingeordnet. Für die Herleitung der HQx-Werte sind die beiden grössten Hochwasser seit 1952 (HW 1953 und 1999) ohne Korrektur des Zürichseestands beibehalten worden, während die vier höchsten Seestände der Periode 1811–1880 (HW 1817, 1821, 1824 und 1876), sowie das grösste Hochwasser der Periode 1881–1951 (HW 1910) korrigiert wurden (ausgefüllte Kreise, kräftige Farben).

Nach der Korrektur ergibt sich eine

neue Rangierung über die nun als homogen angenommene Periode von 1811–2013. Das Hochwasser 1817 liegt nach der Korrektur auf Rang 1 (407.07 m ü. M.) gefolgt vom Hochwasser 1910 und 1999 (407.01 m ü. M.). Dem Hochwasser 2005 wurde eine Wiederkehrperiode von maximal 20 Jahren (Rang 10 oder tiefer) zugeordnet. Die rot gepunktete Linie stellt die vorgeschlagenen Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit dar. Aufgrund der homogenisierten Daten und des Frequenzdiagramms wird am Zürichsee ein HQ30 von 406.80–406.95 m ü. M. und ein HQ100 von 406.95–407.10 m ü. M. vorgeschlagen (Tabelle 1). Das aktuell gültige HQ30 und HQ100 wird demnach eher unterschätzt, das aktuelle HQ300 und EHQ scheinen plausibel.

## 6. Auswertung grosser Hochwasser in Zürich

Bei der Analyse grosser Hochwasser zeigt sich, dass der Zürichsee massgeblich ansteigen muss, bevor sich grosse Abflüsse in die Limmat ergiessen. Die rasch reagierende Sihl hat ihre Hochwasserspitze dann bereits abgeführt, d. h. der zeitliche Versatz reicht meist aus, so dass keine Überlagerung der Abflussspitzen erfolgt. Längere Hochwasser (z. B. Hochwasser 1953, 1999), die durch mehrtägige ergiebige Niederschläge ausgelöst werden, sind daher oft massgebend. Besonders kritisch sind längere, zweigipflige Hochwasser (z. B. Hochwasser 1846 und 1999), weil die erste Spitze den See ansteigen lässt und die Entwässerung des Zürichsees anschliessend lange anhält (insbesondere weil auch der Walensee über eine längere Zeit stark verzögert entwässert) und es bei der zweiten Spitze dann annähernd zu einer Überlagerung kommt. Bei einer vollständigen Überlagerung der Abflussspitzen von Limmat und Sihl sind noch höhere Abflüsse möglich.

Für noch seltenere See-Hochwasser müssten einerseits die massgebenden Niederschläge und andererseits Eventualitäten wie Damnbrüche am Escherkanal berücksichtigt werden, welche beispielsweise die Abflussdämpfung des Walensees rückgängig machen.

## 7. Ausblick

Mehrere Massnahmen zur Erhöhung der Abflusskapazität und zur besseren Regulierung des Zürichsees wurden in den letzten 150 Jahren realisiert, weitere sind bereits geplant oder in Vorbereitung. Es sind dies der Ersatz der Wehranlage des Platzspitzwehrs, die Anpassung der Pfeilerkonstruktion der Rathausbrücke und Ausbaggerung der Limmatsohle zur Erhöhung der Abflusskapazität

an der engsten Stelle der Limmat. Damit sind die Zeiten einer Schifffahrt zum Fraumünster wohl endgültig vorbei.

### Literatur

AWEL (2014): Archivunterlagen zu Limmat, Zürichsee und EZG, Abflussmessungen, Pegelstände, Stationsdokumentationen, Längs- und Querprofile, sowie ältere Unterlagen zu Pegelständen und Hochwassermarken, Pläne, Dokumentationen, usw.

Badoux A., Zappa M., Schatzmann M., Oplatka M., Bösch M., Jaun S., Gross M., Steiner P., Hegg C., Rhyner J. (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Beratung und Alarmorganisation während des Baus der Durchmesserlinie beim Hauptbahnhof Zürich, (2. Teil), «Wasser Energie Luft», 102. Jg., Heft 4, S. 309–320.

BAFU (2014): Hydrographische Jahrbücher, Abflussmessungen, Pegelstände, Stationsdokumentationen, Längs- und Querprofile, sowie ältere Unterlagen zu Pegelständen und Hochwassermarken.

Basler & Hofmann (2008): Gefahrenkartierung Hochwasser Stadt Zürich, Technischer Bericht, Nov. 2008.

Bertschi H. (1936): Die Abflussregulierung des Zürichsees. Wasser- und Energiewirtschaft, Jg. 28, Heft 2+3, 16 S. (Sonderdruck).

Bullinger H. (1504–1575): Diarium: (Annales vitae) der Jahre 1504–1574 zum 400. Geburtstag Bullingers am 18. Juli 1904 hrsg. Von Emil Egli.

Denzler L. (2011): Unberechenbare Sihl Tec21, Heft 17–18, S. 8–23.

Detert M., Schatzmann M. (2014): Hochwasserschutz Zürich (Teil 2) – Daten absoluter Wasserspiegellagen der Gefahrenkarte Stadt Zürich, «Wasser Energie Luft», 106. Jg., Heft 1, S. 27–30.

Dolf F., Krummenacher B., Aller D., Kuhn B., Gauderon A., Schwab S. (2014): Hochwasserschutz Zürich (Teil 2) – Risikoanalyse für ein Sihl-Hochwasser in der Stadt Zürich, «Wasser Energie Luft», 106. Jg., Heft 1, S. 23–27.

Legler G. H. (1868a): Die Abflussverhältnisse des Zürichsee's und beantragte weitere Abflussverbesserungen, sowie Aenderung der Reguliermethode zur Erzielung möglichst niedriger Seestände während des Sommerhalbjahres, Bericht an die Tit. Eidgen. Linthkommission, Schmid'sche Buchdruckerei Glarus.

Maidl E., Graf C., Buchecker M. (2013): Hochwasserschutz Zürich (Teil 1) – Umsetzung von Gefahrenkarten: Ein Beispiel aus der Praxis, «Wasser Energie Luft», 105. Jg., Heft 4, S. 302–306.

Pestalozzi H. (1855): Über die Höhenänderungen des Zürchersee's, Der naturforschenden Gesellschaft in Zürich vorgetragen.

Riesen K. (2007): Rekonstruktion prähistorischer Seespiegelschwankungen im Zürichsee mit Hilfe eines hydrologischen Modells und Überresten neolithischer Ufersiedlungen, Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Zürich, Mai 2007.

Scapozza C., Aller D., Kuhn B., Oplatka M. (2013): Hochwasserschutz Zürich (Teil 1) – Integrales Risikomanagement für den Hochwasserschutz in der Stadt Zürich, «Wasser Energie Luft», 105. Jg., Heft 4, S. 297–301.

Scherrer AG (2013): Hochwasser-Hydrologie der Sihl – Hochwasserabschätzung unterhalb des Sihlsees bis Zürich, Bericht 12/159, Juli 2013, Auftraggeber AWEL, Kt. Zürich.

Scherrer AG (2015): Erkundung und Einordnung historischer Hochwasser an der Limmat in Zürich, Bericht 14/189, April 2015, Auftraggeber AWEL, Kt. Zürich.

Schindler C. (1971): Geologie von Zürich und ihre Beziehung zu Seespiegel-Schwankungen, in: Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 116. Jg., Heft 2, S. 283–315.

Specker, T. (2003): Zur Rekonstruktion historischer Seespiegelstände des Zürichsees vor 1810. Bericht 2002 und 2003, unpublizierter Bericht für die Stadtarchäologie Zürich. Zürich 2002, 2003.

TK Consult (2014): 2d-Simulationen Limmatausfluss (nicht veröffentlichte Zwischenergebnisse).

Vischer D. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz – Von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. Berichte des BWG, Nr. 5.

Wetli K. (1885): Die Bewegung des Wasserstandes des Zürichsee's während 70 Jahren und Mittel zur Senkung seiner Hochwasser, Hofer & Burger, Zürich.

Wetter O., Specker T. (2015): HWS Sihl-Limmat – Schlussbericht Historische Studien, Auftraggeber AWEL, Kt. Zürich.

Zappa M., Jaun S., Badoux A., Schwanbeck J., Addor N., Liechti K., Roeser I., Walsler A., Viviroli D., Vogt S., Gerber M., Trösch J., Weingartner R., Oplatka M., Bezzola G.R., Rhyner J. (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihlthal (1. Teil), «Wasser Energie Luft», 102. Jg., Heft 3, S. 238–248.

### Anschrift der Verfasser

Dr. Daniel Näf-Huber, Dr. Simon Scherrer, Scherrer AG, Schönmatstr. 8, CH-4153 Reinach  
naef@scherrer-hydrol.ch,  
scherrer@scherrer-hydrol.ch.

Dr. Oliver Wetter, Universität Bern, Historisches Institut & Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Länggassstrasse 49, CH-3012 Bern. oliver.wetter@hist.unibe.ch

Thomas Specker, GRAD GIS, Zypressenstrasse 76, CH-8004 Zürich  
gradgis.specker@bluewin.ch

Dr. Matthias Oplatka, Natascha Eisenhut, Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Walcheplatz 2, CH-8090 Zürich  
matthias.oplatka@bd.zh.ch,  
natascha.eisenhut@bd.zh.ch