

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 96 (2004)
Heft: 11-12

Artikel: Wie beeinflusst die Siedlungsentwicklung von Zürich-Nord die Hochwasser der Glatt?
Autor: Naef, Felix / Scherrer, Simon / Frauchiger, Roger
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939598>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wie beeinflusst die Siedlungsentwicklung von Zürich-Nord die Hochwasser der Glatt?

■ Felix Naef, Simon Scherrer, Roger Frauchiger

Zusammenfassung

Im Einzugsgebiet der Glatt haben sich die überbauten Flächen in den letzten Jahrzehnten stark ausgedehnt. Werden dadurch die Hochwasser der Glatt verschärft? Dies wäre zwar angesichts der grossen Zunahme der versiegelten Flächen zu erwarten, spiegelt sich in den langjährigen Abflussmessungen der Glatt aber nicht wider. Im folgenden Artikel wird aufgezeigt, wie mit Modellrechnungen, basierend auf Erhebungen über die relevanten Abflussprozesse, diese Frage geklärt werden konnte. Die beschriebene Vorgehensweise lässt sich auch auf andere hydrologische Fragestellungen anwenden.

serabschätzung zu gewichten sind. Ihre Beantwortung setzt ein detailliertes Verständnis der Hochwasserentstehung voraus. Im Folgenden wird beschrieben, welche Grundlagen dafür zusammengetragen worden sind, zu welchen Resultaten die darauf aufbauenden Berechnungen führten und was für Schlussfolgerungen daraus gezogen werden können.

2. Grundlagen

2.1 Siedlungsentwicklung im Glatttal im 20. Jahrhundert

Die schweizerischen Landeskarten werden in regelmässigen Abständen überarbeitet. Dies erlaubte es, anhand der Kartenblätter von 1932, 1957 und 1995 die damals überbauten Flächen zu ermitteln (Bild 3). 1932 waren im

gesamten Einzugsgebiet der Glatt erst 20 km² überbaut; es existierten, abgesehen vom Kern in Oerlikon, nur kleinere Dörfer und Weiler. Bis 1957 hat sich ein Zentrum im Bereich Zürich-Nord (Affoltern, Oerlikon, Kloten, Wollisellen) gebildet mit meist mässig dicht bebauten Flächen. Vor dem grossen Wachstumsschub zwischen 1960 und 1995 umfasste die bebaute Fläche unterhalb des Greifensees knapp 30 km², diese dehnte sich bis 1990 auf 62 km² aus. Gleichzeitig verdichtete sich der Bebauungsgrad (Bild 3c). Ein weiterer Eingriff in das Abflussverhalten erfolgte mit der Drainierung der ursprünglich verbreiteten Riedflächen.

2.2 Messungen

Für hydrologische Analysen sind zuverlässige Niederschlags- und Abflussmessungen von

1. Einführung

Das Einzugsgebiet der Glatt von 418 km² wird durch den Greifensee unterteilt (Bild 1). Hochwasser, die oberhalb des Greifensees entstehen, werden durch den See stark gedämpft. Unterhalb des Greifensees umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von 245 km². Dabei fliesst die Glatt durch Zürich-Nord, ein Gebiet, das sich in den letzten Jahrzehnten enorm entwickelt hat, und dann entlang des Flughafens Kloten, bevor sie auf weniger dicht besiedeltes Gebiet trifft und schliesslich bei Rheinsfelden in den Rhein mündet.

Ein Hochwasser mit Überflutungen in den dicht bebauten Zonen würde enorme Schäden verursachen. Im Zusammenhang mit der geplanten Verlegung der Glatt im Bereich des Flughafens interessierten deshalb die massgebenden Hochwassermengen. Eine statistische Auswertung der 50-jährlichen Messreihe des Pegels Rümlang (Bild 2), der unterhalb des dicht besiedelten Gebietes steht, ergab ein 100-jährliches Hochwasser von etwas über 100 m³/s. Eine solche Analyse berücksichtigt jedoch nicht die Auswirkungen der Siedlungsentwicklung auf die Grösse extremer Hochwasser. Da Niederschlag auf überbauten und versiegelten Flächen nicht mehr versickert und rascher abfließt, werden in Gebieten mit starker Bau-tätigkeit grössere Hochwasserspitzen erwartet. Es stellt sich daher die Frage, wie diese anthropogenen Eingriffe bei der Hochwas-

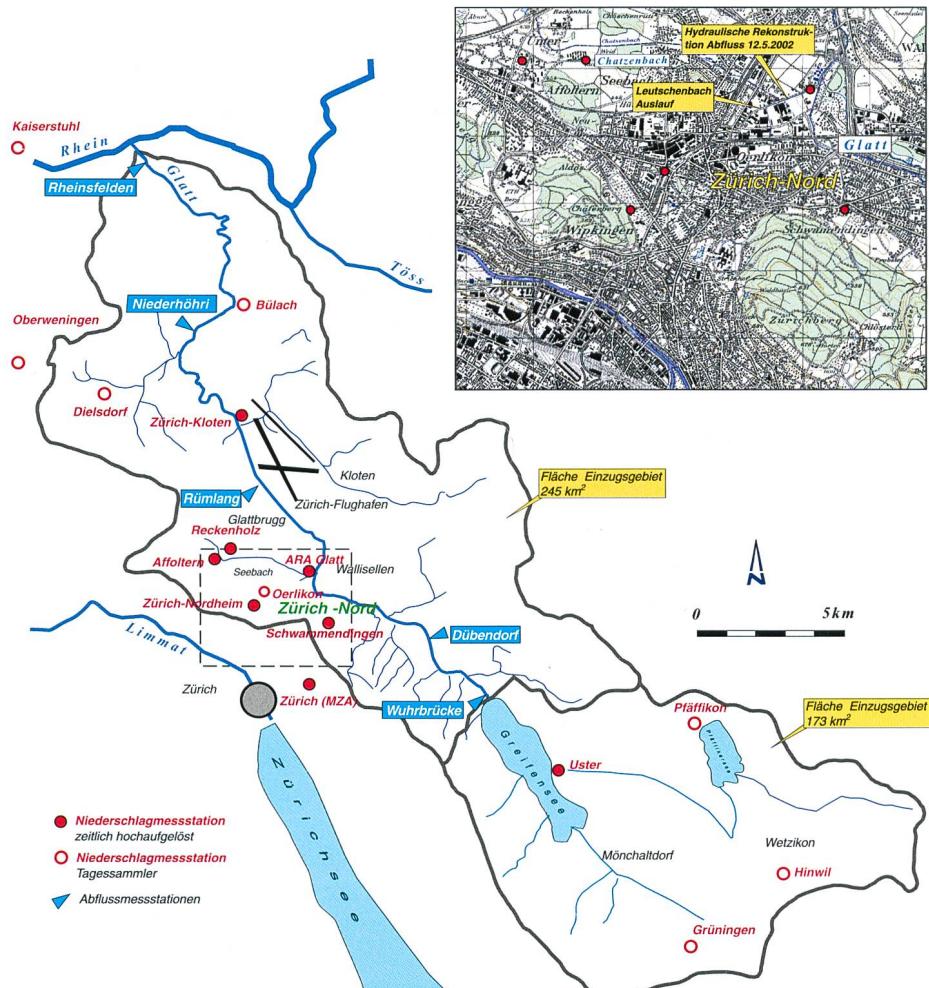


Bild 1. Das Glatt-Einzugsgebiet im Überblick mit den Niederschlags- und Abflussmessstationen und der Situation im Gebiet Zürich-Nord (Ausschnitt).



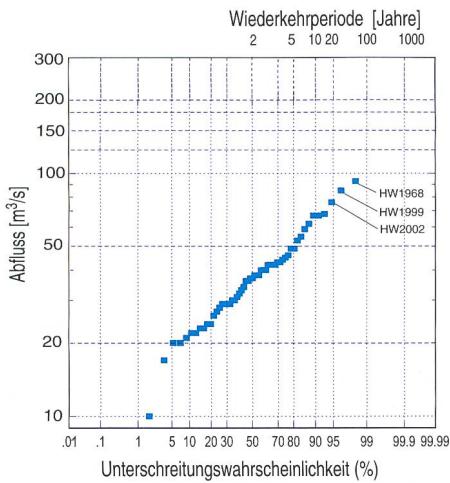


Bild 2. Frequenzdiagramm der Jahresmaxima der Glatt von 1948 bis 2002 beim Pegel Rümlang. Die Werte wurden unter Berücksichtigung der Verkrautung korrigiert.

zentraler Bedeutung; die möglichen Aussagen werden direkt von der Qualität dieser Messungen bestimmt. Die 1950 im Einzugsgebiet der Glatt installierten zehn Niederschlags-Tagessammler und drei Niederschlagsschreiber mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten erlauben nur einen begrenzten Einblick in den damaligen Niederschlagsverlauf. Die Zahl der Niederschlagschreiber erhöhte sich im Laufe der Zeit; beim Hochwasser im Jahr 2002 standen zehn Stationen im Einsatz. Eine wesentliche Verbesserung ergab sich durch den Niederschlagsradar der SMA auf dem Albis, dessen Daten seit 1990 digital abgerufen werden können (Bild 6). Allerdings weichen diese Daten stark von den am Boden gemessenen ab. Sie können daher nicht direkt für die Berechnungen verwendet werden, zeigen aber ein differenziertes Bild des oftmals komplexen Niederschlagsverlaufs.

1948 wurde an der Glatt in Rümlang ein Pegel installiert. Obwohl die Glatt an dieser Stelle ein stabiles Trapezprofil aufweist, gelang es nicht, eine eindeutige Pegelstand-Abfluss-Beziehung zu entwickeln. Die damit ermittelten Abflüsse waren vor allem bei Hochwassern unsicher. Probleme verursachte die im Frühling und Sommer in der Glatt oft auftretende Verkrautung. Diese kann, wie Bild 4 zeigt, den Wasserstand unterhalb der Pegelstelle bei vergleichbaren Abflüssen um mehr als einen halben Meter erhöhen. Nach aufwändigen Untersuchungen, bei denen das Gerinne ober- und unterhalb des Pegels neu vermessen wurde, und mit ausführlichen hydraulischen Nachrechnungen unter Berücksichtigung der Verkrautung wurden die Abflüsse bei grossen Hochwassern neu berechnet. Die so ermittelten Jahresmaxima der Messperiode sind in Bild 5 dargestellt.

1970 wurden beim Ausfluss aus dem Greifensee und 1976 in Dübendorf und kurz vor der Mündung in den Rhein weitere Pegel errichtet, deren Messungen auch in diese Arbeit einflossen.

2.3 Hochwassergeschichte

In historischen Quellen wird erstmals 1852 ein Glatthochwasser erwähnt. Damals soll der ganze Talboden überflutet gewesen sein und einem See geglichen haben. Da die Abflusskapazität der Glatt damals wesentlich geringer war, lässt sich daraus wenig über die Grösse der Abflüsse ableiten. Insgesamt vermitteln die historischen Schilderungen den Eindruck, dass die Glatt eher gedämpft auf starke Niederschläge reagiert. Auch die spärlichen Angaben über die Hochwasser von 1876, 1910 und 1932 deuten nicht auf aussergewöhnliche Abflüsse hin.

Seit Beginn der Messungen 1948 ereigneten sich sieben Hochwasser mit Abflüssen über $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Trotz stark zunehmender Versiegelung zwischen 1960 und 1990 besteht nur ein schwacher Trend zu höheren Abflüssen, wie das gleitende Mittel der Jahresmaxima über sieben Jahre zeigt (Bild 5). Die grössten Hochwasser ereigneten sich nach Niederschlägen von über 15 Stunden Dauer am 21. September 1968 ($93 \text{ m}^3/\text{s}$) und am 12. Mai 1999 ($85 \text{ m}^3/\text{s}$). Aufgrund der historischen Auswertungen war das Hochwasser von 1968 eines der grössten, wenn nicht sogar das grösste Hochwasser der letzten ca. 100 Jahre. Bemerkenswert ist noch das Ereignis vom 12. Mai 2002, das durch ein intensives lokales Gewitter über Zürich-Nord ausgelöst wurde.

2.4 Folgerungen

Trotz beträchtlicher Zunahme der Versiegelung lässt sich keine wesentliche Verschärfung der Hochwasser der Glatt nachweisen. Dies widerspricht den gängigen Vorstellungen. Den Gründen für dieses Verhalten soll in den folgenden Kapiteln nachgegangen werden, basierend auf dem Verständnis der abflussbildenden Prozesse auf natürlichen und bebauten Flächen und der Charakteristik der massgebenden Niederschläge über dem Einzugsgebiet.

3. Was bestimmt die Grösse extremer Hochwasser?

3.1 Einleitung

Die Abflüsse in komplex aufgebauten Einzugsgebieten lassen sich mit geeigneten mathematischen Niederschlag-Abfluss-Modellen nachvollziehen. Um damit einen 100-jährlichen Abfluss zu bestimmen, muss das Gebiet mit entsprechenden Niederschlä-

Bild 3a:

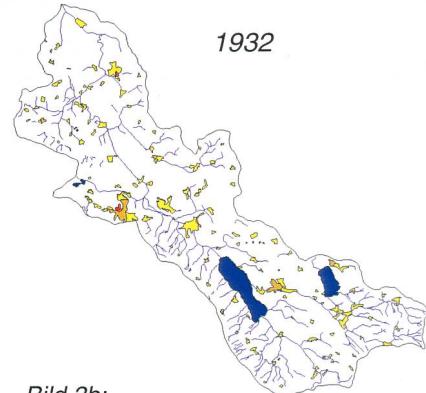


Bild 3b:

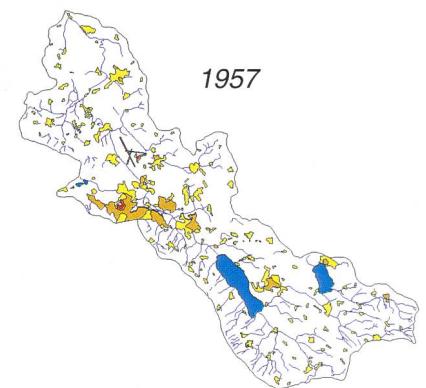
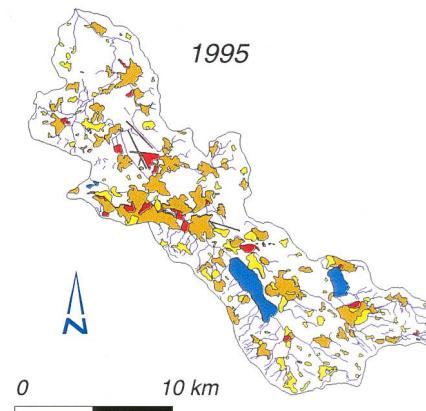


Bild 3c:



Legende

- Einzugsgebiet
- Siedlungstyp 1: dicht bebaut Flächen
- Siedlungstyp 2 mässig dicht bebaut Flächen
- Siedlungstyp 3: locker bebaut Flächen

Bild 3. Siedlungsgeschichte zwischen 1932 und 1995 im Glatttal.

gen «berechnet» werden (Kapitel 3.2). Zusätzlich ist ein fundiertes Verständnis der Abflussprozesse auf natürlichen Flächen und besonders auch auf Siedlungsflächen notwendig (Kapitel 3.3).

3.2 Massgebende Niederschläge

Auswertungen von statistisch ermittelten Niederschlägen definierter Jährlichkeit exis-

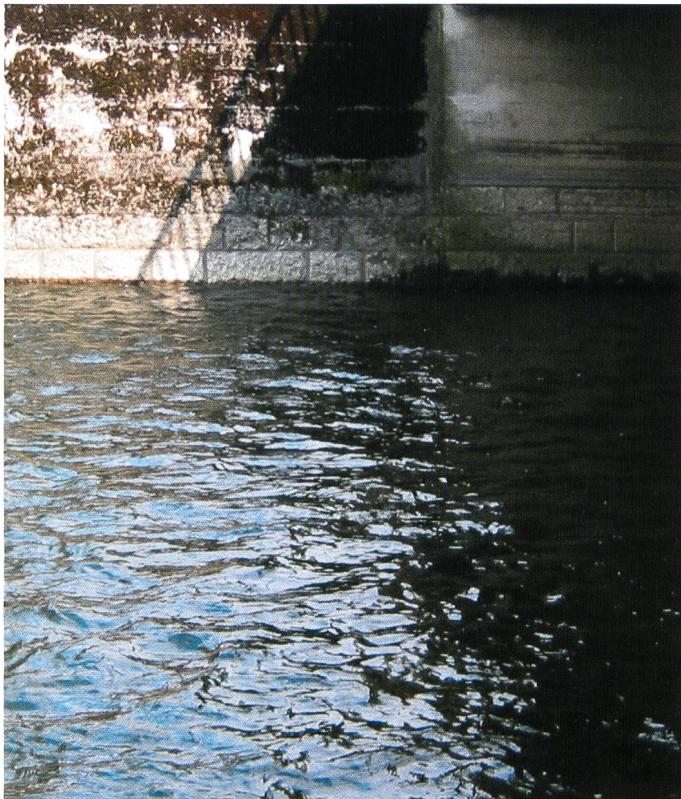
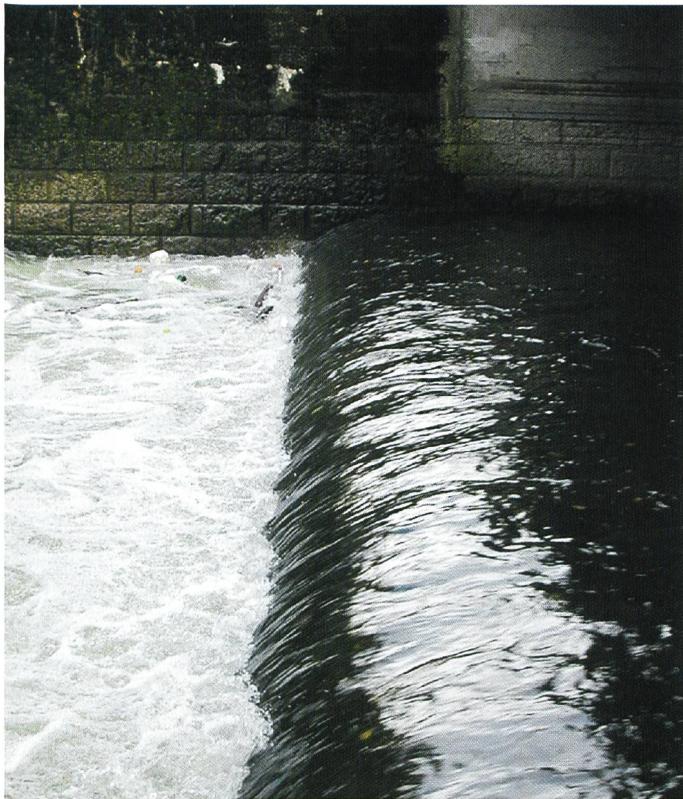


Bild 4. Die Glatt beim Pegel Rümlang am 26. Oktober 2000 bei einem Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (links) und am 16. April 2002 bei einem Abfluss von $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (rechts). Die starke Verkrautung zu diesem Zeitpunkt bewirkte eine Erhöhung des Wasserspiegels um einen halben Meter, sodass der Überfall verschwindet.

tieren für einzelne Stationen (Punktwerte). Diese Werte lassen sich aber nicht direkt auf grössere Flächen übertragen. Wie solche Übertragungen vorgenommen werden sollen, ist offen, da wenig über die Ausdehnung von extremen Niederschlagsgebieten bekannt ist. Im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES, Grebner et al., 1998) werden Abminderungsfaktoren für den Übergang von Punkt- zu Flächenniederschlägen vorgestellt. Diese sind aber für die vorliegende Untersuchung zu wenig detailliert. Um massgebende Niederschlagsszenarien festzulegen, musste daher ein anderer Weg gewählt werden. Aus den Aufzeichnungen der letzten 50 Jahre wurden drei Starkregenereignisse ausgewählt, die sich in ihrer Charakteristik unterscheiden und die zu grossen Hochwassern geführt haben. Basierend auf diesen Ereignissen wurden Szenarien für 100-jährliche Ereignisse mit realistischen räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilungen hergeleitet.

Hochwasser 1968

Als am 21. September 1968 ein grosser Niederschlag das Einzugsgebiet der Glatt nahezu flächendeckend traf, war der Ballungsraum in Zürich-Nord erst am Entstehen. Bild 6a zeigt die räumliche Verteilung des Niederschlags, ermittelt anhand der damals vorhandenen Bodenstationen. In Kloten wurden innerhalb 15 h 110 mm Niederschlag auf-

gezeichnet, davon 100 mm in 10 h. Die Abflussmessstation in Rümlang registrierte eine Abflussspitze von $93 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bild 7), etwa 30% des Niederschlags flossen ab.

Hochwasser 1999

Im Mai 1999 wurden an etlichen Flüssen, wie z.B. dem Rhein bei Basel, der Aare bei Untersiggenthal und der Reuss bei Mellingen, Hochwasser beobachtet, die zu den grössten der letzten 50 bis 100 Jahre gehörten. Der

Hauptniederschlag dauerte im Einzugsgebiet der Glatt etwa 24 h. Oberhalb des Greifensees fielen bis 140 mm Niederschlag (Bild 6b), die daraus resultierenden Abflüsse wurden aber durch den Greifensee gedämpft. Unterhalb des Greifensees war der Niederschlag mit 120 mm etwas geringer, d.h. der Ballungsraum Zürich-Nord wurde nicht voll getroffen. Im Unterlauf der Glatt waren die Niederschlagsmengen wesentlich kleiner. Nach ca. 18 Stunden wurde die Abflussspitze von

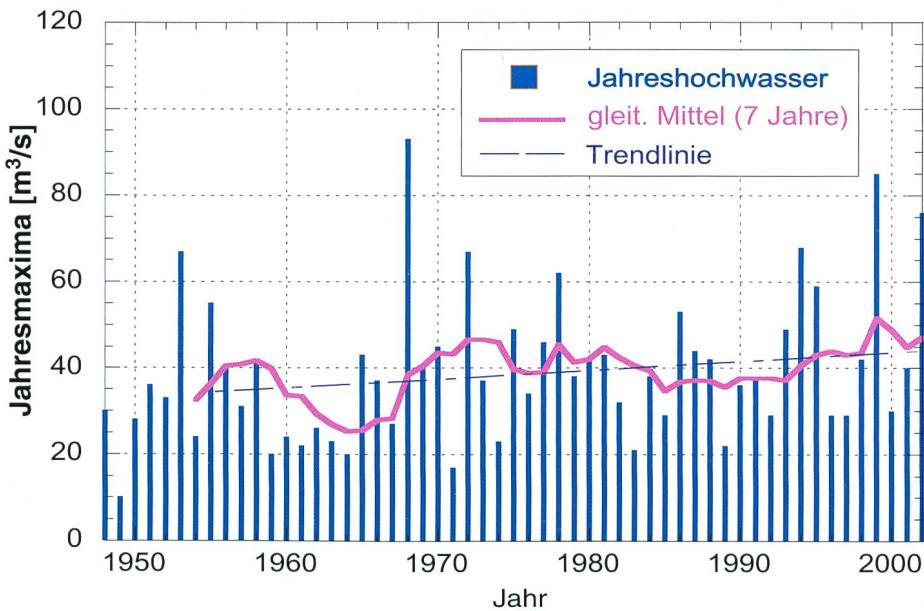


Bild 5. Jahresmaxima der Glatt am Pegel Rümlang (1948–2002). Das gleitende Mittel über sieben Jahre zeigt nur einen schwachen Trend.

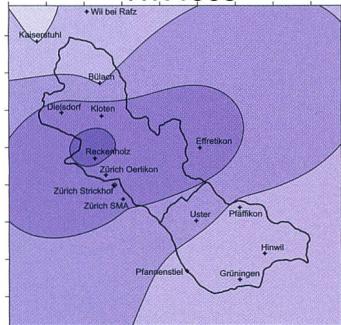
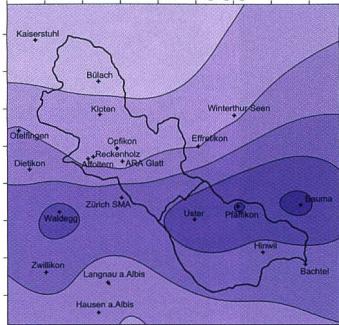
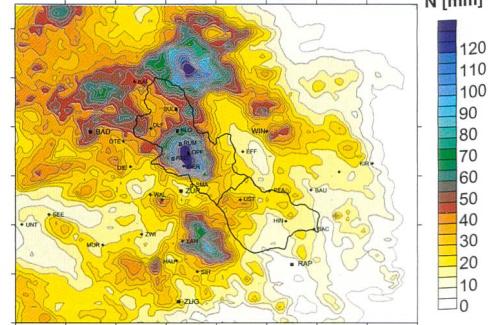
Bild 6a: HW1968**Bild 6b: HW 1999****Bild 6c: HW 2002**

Bild 6a-c. Die Niederschlagsverteilung bei den Hochwassern vom 21. September 1968, 12. Mai 1999 und 12. Mai 2002. 1968 lag der Hauptteil des Niederschlags unterhalb, 1999 oberhalb des Greifensees. Nach den Radardaten traf das Gewitter vom 12. Mai 2002 im Wesentlichen das stark bebaute Gebiet von Zürich-Nord.

85 m³/s in Rümlang (Bild 7) und von 120 m³/s bei der Mündung in den Rhein erreicht. Aufgrund der ergiebigen Niederschläge in der Vorperiode war die Vorfeuchte gross und 38% des Niederschlags flossen ab.

Hochwasser 2002

Genau drei Jahre später wurde am Abend des 12. Mai 2002 hauptsächlich das Siedlungsgebiet zwischen Oerlikon-Opfikon-Reckenholz von einem Starkniederschlag getroffen, wie die aus den Radardaten ermittelte Niederschlagsverteilung illustriert (Bild 6c). Die im Kerngebiet liegenden Niederschlagsstationen der SMA Kloten, Reckenholz und Zürich, und die vier Stationen des ERZ (Entsorgung und Recycling, Stadt Zürich) zeichnen ein räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes Bild des Niederschlagsgeschehens über Zürich-Nord (Bild 8). Über diesem Gebiet fielen in einer Stunde bis zu 40 mm und insgesamt ca. 70 mm. In Rümlang wurde nach einer Anstiegszeit von knapp 5 h eine Abflusspitze von 76 m³/s registriert, insgesamt sind aber nur 14% des Niederschlags abgeflossen.

Die in Bild 7 dargestellten Ganglinien der drei Ereignisse zeigen bezüglich Anstiegszeit und Volumen charakteristische Unterschiede. Das Hochwasser 2002 ist kurz mit wenig Volumen. Trotz zwischenzeitlich gewachsener Versiegelung und hoher Vorfeuchte war der Maximalabfluss 1999 geringer als 1968. Das bedeutet, dass die etwas kürzere Niederschlagsdauer 1968 besser der Anlaufzeit des Gebietes entspricht und damit bezüglich Spitzenabfluss kritischer ist. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik eignen sich diese Hochwasser für die Herleitung von Niederschlagsszenarien für die Modellrechnungen.

3.3 Herleitung von Niederschlagsszenarien

Anhand dieser Ereignisse wurden folgende Niederschlagsszenarien mit einer Wiederkehrperiode von etwa 100 Jahren abgeleitet:

- Szenario A: Da das Hochwasser 1968 das grösste der Messperiode und aufgrund der historischen Erhebungen wahrscheinlich auch das grösste im 20. Jahrhundert war, wird angenommen, dass das Nieder-

schlagsfeld von 1968 etwa einem 100-jährlichen Ereignis entspricht. 1968 waren unterhalb des Greifensees etwas über 30 km² überbaut, heute jedoch über 62 km² mit einer grösseren Siedlungs-dichte. In Szenario A wird deshalb angenommen, dass der Niederschlag vom 21. September 1968 auf das Glatttal mit der heutigen Überbauungsdichte fällt.

- Szenario B: Das Niederschlagsfeld vom Mai 1999 war über dem Kanton Aargau wesentlich stärker ausgeprägt als über der Glatt. Dieses Feld wurde so verschoben, dass das Einzugsgebiet der Glatt voll getroffen wird.
- Szenario C: Der Gewitterniederschlag vom 12. Mai 2002 über Zürich-Nord wird bei gleicher räumlicher Ausdehnung in der Hauptphase um 50% erhöht und dürfte so etwa einem 100-jährlichen Starkregen-ereignis entsprechen.

3.4 Abflussbildung bei Starkniederschlägen

Ein Niederschlag-Abfluss-Modell enthält Annahmen, wie eine Fläche auf einen Nieder-

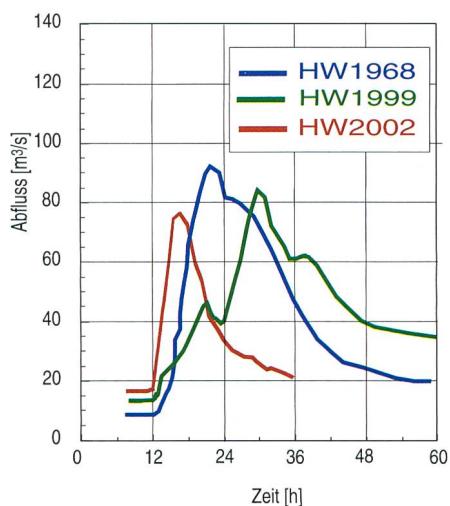


Bild 7. Die Abflussganglinien der drei grössten Hochwasser an der Glatt seit 1948.

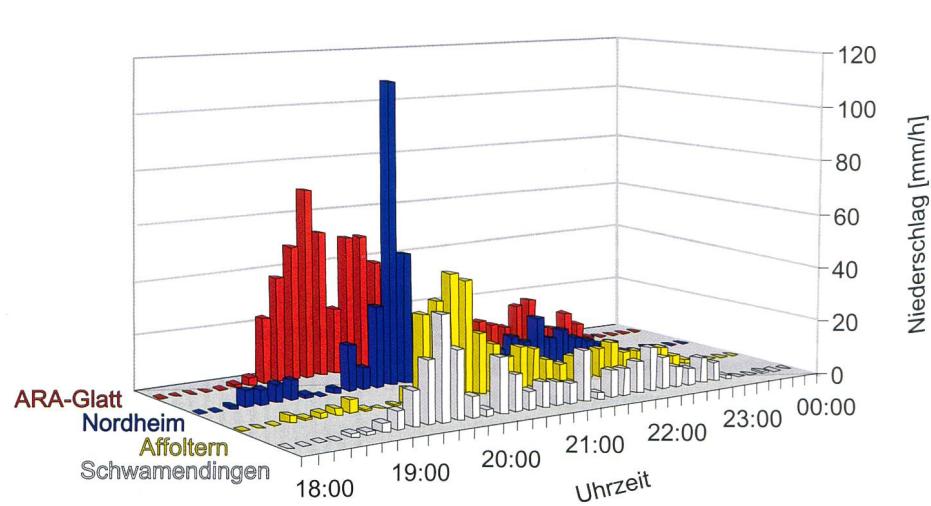


Bild 8. Die Aufzeichnungen der vier Niederschlagsstationen in Zürich-Nord vom 12. Mai 2002 zeigen eindrücklich den chaotischen Niederschlagsverlauf bei Gewitterereignissen.

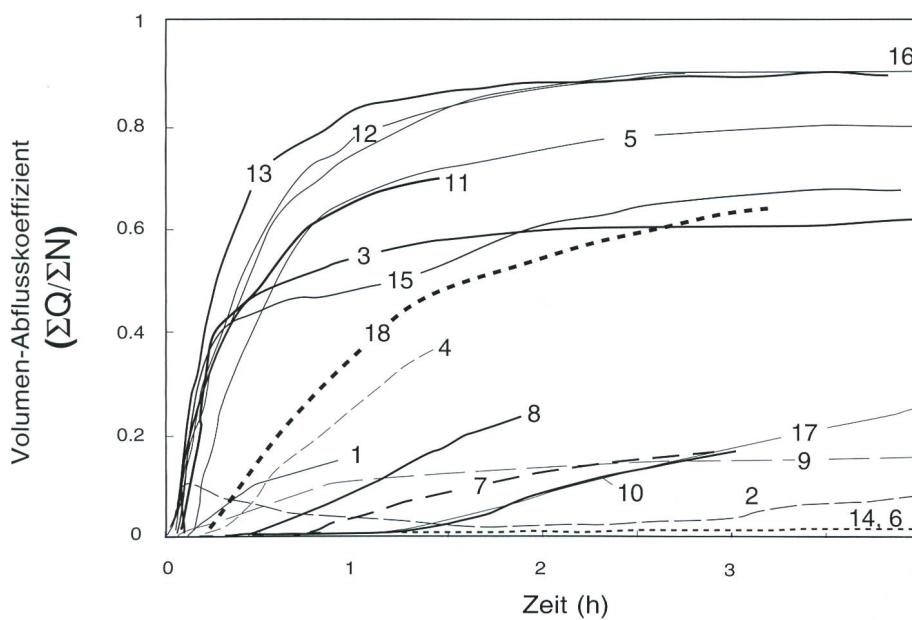


Bild 9. Abflusskoeffizienten bei 18 Beregnungsversuchen (Niederschlagsintensität: 50–100 mm/h). Bei den Standorten 12, 13 und 16 fliesst schon nach 1 h ein Grossteil des Niederschlags ab. Bei 2, 6, 10 und 14 infiltriert der Niederschlag während Stunden, ohne dass wesentlicher Abfluss entsteht.

schlag reagiert, wie viel Wasser versickert und zurückgehalten wird und wie viel rasch abfließt. Ein Hochwasser entsteht aus der Überlagerung der Abflüsse aller Teilstufen eines Einzugsgebietes, wobei wenig durchlässige Flächen stärker zum Hochwasser beitragen als gut durchlässige, speicherfähige Flächen.

Im Folgenden werden Überlegungen über das Verhalten von natürlichen und versiegelten Flächen vorgestellt.

Wie reagieren natürliche Flächen bei Starkregen?

Natürliche Flächen reagieren sehr unterschiedlich auf Starkregen. Wie gross die Unterschiede sein können, zeigten Beregnungsversuche, die auf Flächen von 60 m² mit Niederschlagsintensitäten von 55 bis 100 mm/h durchgeführt wurden (Scherrer, 1997). Diese Intensitäten, aufgebracht während einer Stunde, entsprechen etwa einem 100-jährlichen Ereignis. Am Fusse der Flä-

chen wurden die Abflüsse auf der Oberfläche und im Boden gemessen, mit zusätzlich auf der Fläche platzierten Messgeräten wurden die Wassergehalte und -flüsse im Boden beobachtet.

Bild 9 zeigt die Resultate dieser Versuche an 18 Standorten bei relativ trockenen Vorbedingungen. Dargestellt ist der Volumenabflusskoeffizient (Abflusssumme dividiert durch Niederschlagsumme) in Abhängigkeit der Beregnungsdauer. Standorte Nr. 12, 13 und 16 zeigen eine rasche, starke Reaktion. Im Gegensatz dazu infiltriert bei den Standorten 7, 10 und 17 sämtlicher Niederschlag während einer Stunde; bei den Standorten 2, 6 und 14 geschah dies sogar über mehrere Stunden. Während der Niederschlag an vielen Standorten vor allem oberflächlich abfloss, dominierte bei anderen der Abfluss im Boden. Angesichts dieser Resultate muss in natürlichen Einzugsgebieten mit einer grossen räumlichen Variabilität der Abflussbereitschaft gerechnet werden. Anhand der detaillierten Messungen auf den berechneten Flächen, den erhobenen Bodenkennwerten und detaillierten Modellrechnungen konnten die Ursachen für das unterschiedliche Abflussverhalten ermittelt werden und auf die Beschaffenheit und Struktur der Böden zurückgeführt werden (Naef et al., 1998).

Eine neu entwickelte Methodik erlaubte es, diese Erkenntnisse anhand von topografischen und geologischen Karten und detaillierten Bodenkarten auf Einzugsgebiete zu übertragen. Eine so erstellte Karte der Abflussbereitschaft des Einzugsgebietes der Glatt zeigt Bild 10. Von der Einzugsgebietsfläche von 245 km² unterhalb des Greifensees sind 184 km² natürliche Flächen. Flächen vom Abflusstyp 1, die rasch und stark beitragen (z.B. Böden mit Infiltrationshemmnissen, Nassböden an Hanglagen), fehlen weitgehend. Auch Abflusstyp 2, der Flächen umfasst, die leicht verzögert beitragen (z.B. verhärtete Böden an Hängen, gerinnen nahe Nassflächen), ist mit 1% Flächenanteil wenig verbreitet. Als verzögert beitragend (Abflusstyp 3) sind 25% der natürlichen Flächen kariert worden. Dies sind von Stauwasser beeinflusste Böden in Hanglagen und steile, flach- bis mittelgründige Böden mit Felsuntergrund. Dem Abflusstyp 4 (stark verzögert beitragende Flächen) gehören 62% an (Hangflächen mit normal durchlässigen, flachgründigen Böden, normal durchlässige Böden in ebener bis leicht geneigter Lage, ebene drainierte Flächen). Dem Abflusstyp 5 (sehr stark verzögert beitragende Flächen) gehören 11% an. Dies sind ebene Flächen mit Böden hoher Durchlässigkeit und grosser Mächtigkeit oder durchlässige Böden über durchlässigen geologischen Ablagerungen

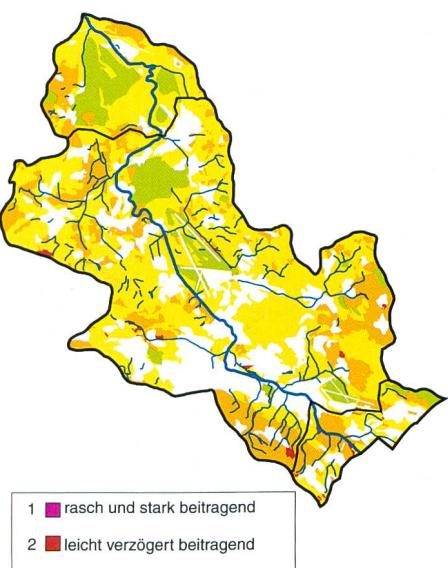


Bild 10. Die Karte der zu erwartenden Abflussreaktion auf den land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet der Glatt.

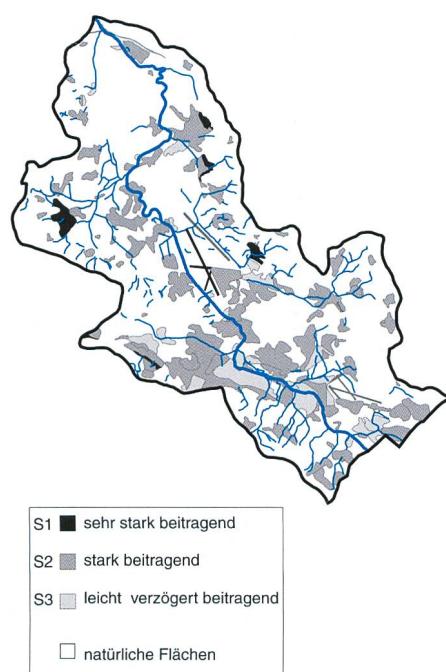


Bild 11. Karte der zu erwartenden Abflussreaktion auf den Flächen des Siedlungsgebiets.



(z.B. Schotterflächen mit grossem Grundwasserabstand). Der grosse Anteil an stark und sehr stark verzögert reagierenden Flächen lässt eine gedämpfte Reaktion des Einzugsgebietes erwarten und bestätigt die Resultate der Recherche über historische Hochwasser. Die kartierten Flächen bilden eine wesentliche Grundlage für die Modellierung des Abflusses der Glatt.

Wie reagieren Siedlungsflächen auf Starkregen?

In der Siedlungsentwässerung gibt es Richtlinien zur Beurteilung von befestigten Flächen nach der Abflussbereitschaft (siehe z.B. VSA, 1989). Niederschlag, der auf Strassenflächen, Hausdächer, Vorplätze usw. fällt, fliesst rasch ab; Niederschlag auf unversiegelte Flächen nur verzögert. Dies wird berücksichtigt, indem primär nur die versiegelten Flächen betrachtet werden (reduzierte Fläche). Die auf versiegelten Flächen zu erwartenden Abflusskoeffizienten werden üblicherweise anhand von Tabellen festgelegt. Abflussmessungen zur Überprüfung dieser Annahmen wurden in der Kanalisation in verschiedenen kleineren Gebieten durchgeführt, es gibt aber kaum Untersuchungen über das Verhalten von grösseren zusammenhängenden Siedlungsgebieten.

In dieser Studie wurde das folgende Vorgehen gewählt. Zuerst wurde im Siedlungsraum unterhalb des Greifensees, der 61 km² umfasst, drei Siedlungstypen unterschieden (Bild 11): Siedlungstyp S1 mit dicht bebauten und versiegelten Flächen (Ortskerngebiete, Industrieflächen: 6% der Siedlungsflächen), Siedlungstyp S2 mit mässig dicht bebauten Flächen (Stadtflächen mit Grünanteil: 75% der Siedlungsflächen) und Siedlungstyp S3 mit locker bebauten Flächen mit grossem Grünflächenanteil (z.B. Einfamilienhaussiedlungen: 19% der Siedlungsflä-

chen). Die Annahmen bezüglich Abflussbildung beruhen auf folgenden Beobachtungen und Überlegungen:

- Die 50-jährige Messreihe des Pegels Rümlang wurde nach kurzen, steilen, nicht unbedingt grossen Abflussspitzen durchsucht, die durch Gewitterniederschläge über den dicht überbauten Gebieten verursacht sein könnten. Solche Spitzen sind aber kaum vorhanden. Dies lässt vermuten, dass die Abflüsse aus besiedelten Gebieten bisher eher überschätzt wurden. Ähnliches zeigt ein Kataster des ERZ, in dem durch die Siedlungsentwässerung verursachte Überflutungen seit den 80er-Jahren erfasst sind. Da die Siedlungsentwässerung meist auf 10-jährliche Ereignisse dimensioniert ist, sollten in der überblickten Periode von 20 Jahren Probleme recht häufig sein. Dies ist aber nicht der Fall. Wenn sich Probleme ergeben, entspricht das auslösende Ereignis oft nicht dem Dimensionierungsniederschlag, sondern es sind dafür lokal bedingte Rückstaueffekte oder Einstau durch den Vorfluter verantwortlich. Dies ist ein Hinweis, dass das Entwässerungssystem geringere Wassermengen abführt, als bei der Dimensionierung angenommen wurde.
- Auch das gut dokumentierte Gewitter vom 12. Mai 2002, das wesentlich grösser war als ein 10-jährliches Ereignis, verursachte keine grossräumigen Probleme. Seine Analyse erlaubte einen Einblick in die Abflussbildung der stark besiedelten Zonen in Zürich-Nord. Bild 12 zeigt den Auslauf des Leutschenbachs, der den Hauptstrang der Entwässerung von Zürich-Nord bildet. Der Abfluss des Leutschenbachs wird nicht gemessen. Der Spitzenabfluss bei diesem Ereignis unterhalb des Auslasses konnte jedoch rekonstruiert werden



Bild 12. Der Leutschenbach oberhalb des Fernsehstudios, der den Grossteil des Gebiets Zürich Nord entwässert.

anhand der über 900 m gut sichtbaren, nachträglich vermessenen Hochwasserspuren (Bild 13). Aus dem ca. 8 km² grossen, mehrheitlich versiegelten Einzugsgebiet des Leutschenbachs flossen im Mai 2002 maximal 20–25 m³/s ab. Angesichts der beträchtlichen räumlichen Ausdehnung der Niederschlagszelle, der registrierten Niederschlagsintensitäten und der starken Versiegelung des Einzugsgebiets ist dieser Wert gering. Er liegt auch wesentlich unter den 45 m³/s, die sich bei einem 10-jährlichen Ereignis im Leutschenbach einstellen sollten.

Die Frage drängt sich auf, wieso der Abfluss aus diesem Ballungsraum so gedämpft verläuft. In Anbetracht der übergeordneten Bedeutung dieser Frage wären weitere Untersuchungen angebracht. Nach dem heutigen Kenntnisstand dürften zwei Gründe dafür verantwortlich sein:

Auch auf stark versiegelten Flächen gelangt nicht alles Wasser unmittelbar in die Kanalisation. Es wird an zahlreichen Stellen, z.B. auf Flachdächern, am Strassenrand, in Mulden, auf Plätzen, kurzfristig gespeichert (dezentrale Retention). Vor allem in den flachen Gebieten im Glatttal können so über das gesamte Einzugsgebiet gesehen beträchtliche Wassermengen zurückgehalten werden.

Wenig ist bekannt über die räumliche Ausdehnung von Starkregenzellen. Es gibt aber Hinweise, dass deren Ausdehnung und deshalb auch das über einem Gebiet aufgebrachte und zum Abfluss gelangende Wasservolumen geringer sind als gemeinhin angenommen. Dies zeigen die vier Niederschlagsstationen des ERZ, die den Niederschlag vom 12. Mai 2002 in Zürich-Nord zeitlich hoch aufgelöst erfasst haben und trotz geringer Entfernung grosse Unterschiede in Verlauf, Intensität und Mengen aufweisen (Bild 8).

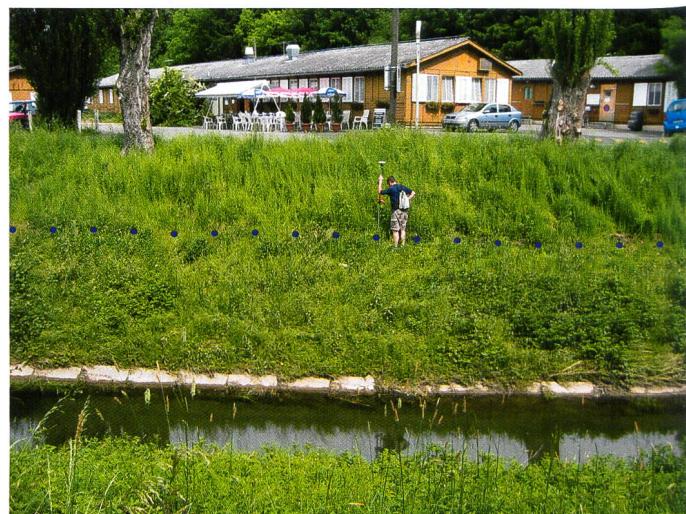


Bild 13. Vermessung der Spuren des 2002-Hochwassers im Gerinne des Leutschenbachs (blau gepunktete Linie) vor der Mündung in die Glatt als Grundlage zur Rekonstruktion der Abflussspitze.

4. Abflussberechnungen

4.1 Aufbau des Niederschlag-Abfluss-Modells

Für das Einzugsgebiet der Glatt wurde ein mathematisches Niederschlag-Abfluss-Modell (Q_{AREA}) aufgebaut, das die Abflussreaktion der Siedlungsflächen und der natürlichen Flächen getrennt berechnet (Bild 14). Jedem Abflusstyp wurde für die Abflussberechnungen eine sog. Abflussreaktionskurve zugeordnet, welche den Anteil des abfließenden Niederschlags in Abhängigkeit der Niederschlagssumme beschreibt (Bild 15). Die räumliche Verteilung der Abflusstypen der Siedlungsflächen und der land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen bestimmen die Abflussreaktion des Einzugsgebiets.

Für natürliche Flächen bilden die Belegungsversuche eine Grundlage für die Herleitung von Abflussreaktionskurven. Für die Entwicklung von Abflussreaktionskurven für grosse besiedelte Flächen stehen keine ausreichenden Unterlagen oder Messungen zur Verfügung. In der vorliegenden Studie wurden diese Kurven in einem interaktiven Prozess bestimmt. Dazu wurden mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell Q_{AREA} grosse Hochwasser nachgerechnet und dabei die Abflussreaktionskurven so verändert, dass die Simulationen mit den beobachteten Abflüssen übereinstimmten.

4.2 Resultate

Bild 16A–C zeigt die Resultate für die drei in Kapitel 3.3 entwickelten Szenarien im Vergleich mit den ursprünglichen Ganglinien. In Szenario A, in dem der Niederschlag vom 21. September 1968 auf das Einzugsgebiet mit der heutigen Besiedlungsdichte fällt, spiegelt sich in der Erhöhung der Abfluss spitze um 34% von $93 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $125 \text{ m}^3/\text{s}$ die Vergrösserung der versiegelten Fläche seit 1968 wider. Szenario B, bei dem die Starkniederschlagszone vom 12. Mai 1999 vom Kanton Aargau über das Glatttal verschoben wurde, ergibt mit $105 \text{ m}^3/\text{s}$ einen geringeren Spitzenabfluss. Szenario A führt zur grössten Abflussspitze, weil die Dauer des Niederschlags ungefähr der Anlaufzeit des Gebietes entspricht und die Niederschlagszelle eine ausreichende räumliche Ausdehnung hat. Umgekehrt ist bei Szenario C, bei dem der Intensivniederschlag vom 12. Mai 2002 über Zürich-Nord um 50% erhöht wurde, die Dauer des Niederschages so kurz, dass nicht das gesamte Einzugsgebiet beitragen kann. Offensichtlich führt ein Gewitter, auch wenn es die am dichtesten bebauten Gebiete trifft, trotz hohen Intensitäten nicht zu den grössten Abflüssen, weil die überregnete Fläche zu begrenzt ist.

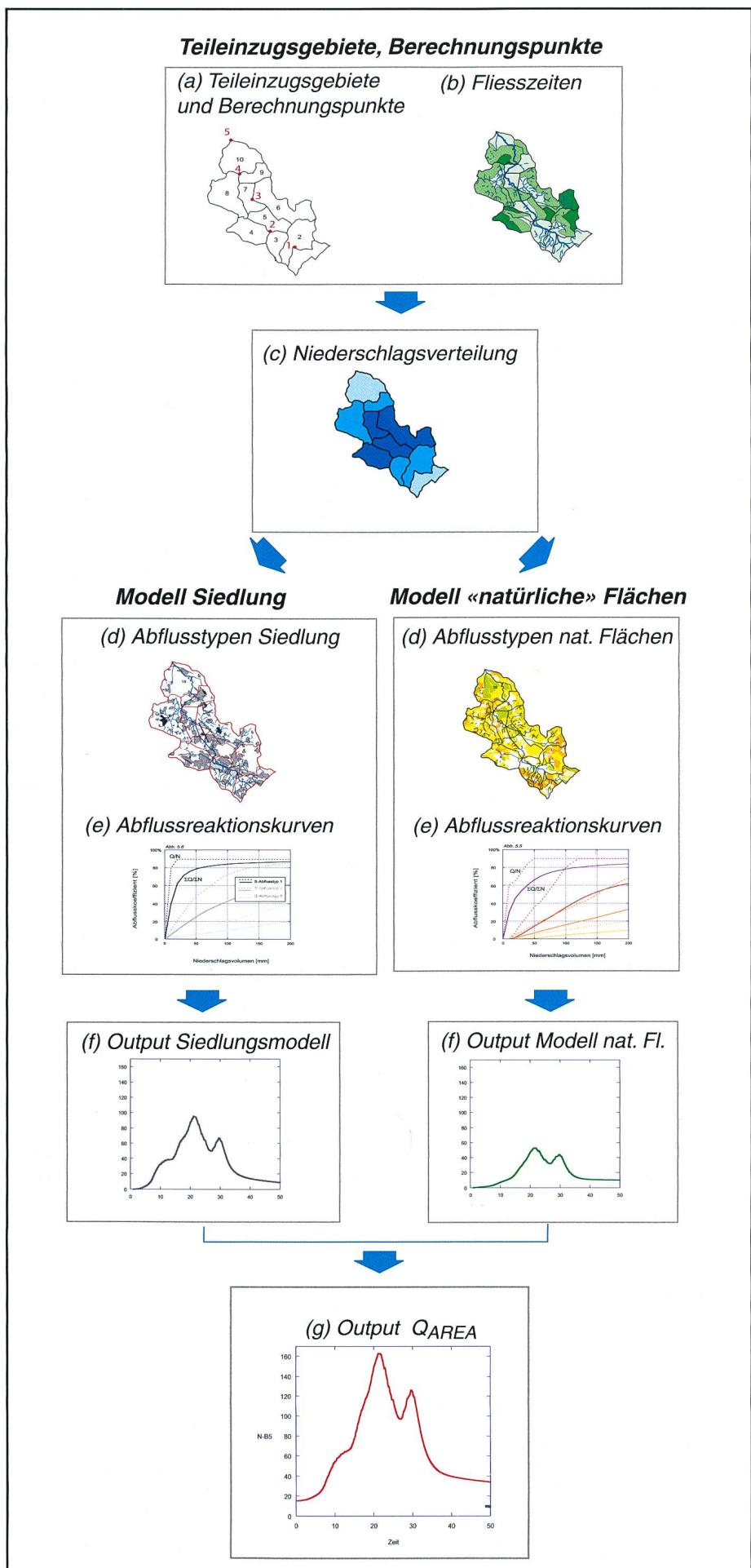


Bild 14. Ablaufschema des Modells Q_{AREA} , das den Abfluss von Siedlungsflächen und natürlichen Flächen getrennt berechnet.



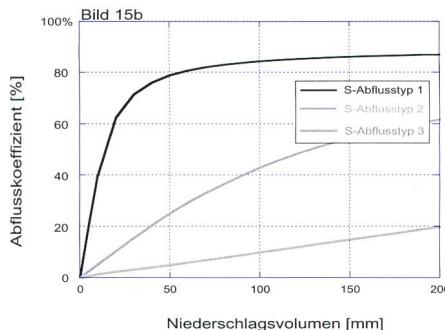
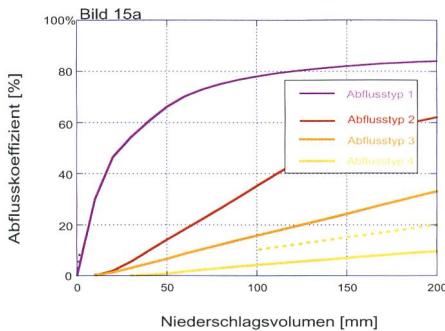


Bild 15a. Die Abflussreaktionskurven für land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen. Diese beschreiben den Anteil des abfließenden Niederschlags in Abhängigkeit der Niederschlagssumme.
Bild 15b. Abflussreaktionskurven für die Siedlungsflächen.

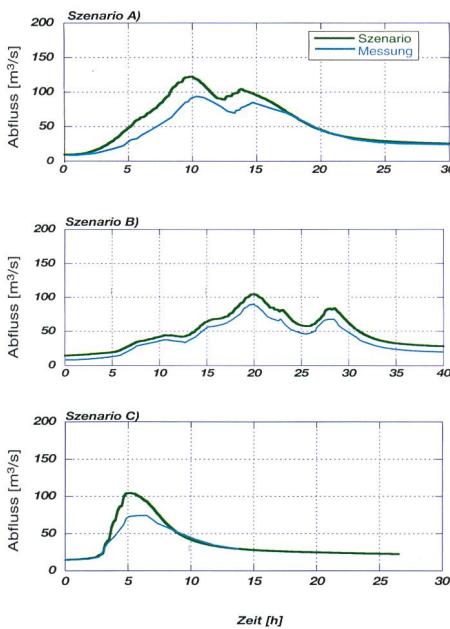


Bild 16. Die mit Q_{AREA} ermittelten Abflussganglinien für die Szenarien im Vergleich mit den ursprünglich gemessenen Abflüssen:

- A) Niederschlag vom 21. September 1968 auf heutige Verhältnisse;**
- B) Niederschlagsfeld über dem Aargau vom 12. Mai 1999 auf das Gebiet der Glatt verschoben;**
- C) Intensivphase des Niederschlags vom 12. Mai 2002 um 50% erhöht.**

Zusätzliche Berechnungen wurden auch für den Abschnitt zwischen Rümlang und der Mündung in den Rhein durchgeführt, der jedoch wesentlich gedämpfter reagiert als das Teilgebiet bis Rümlang.

5. Schlussfolgerung

Mit den 50-jährigen Abflussmessungen und mit den Erkundigungen über historische Hochwasser lässt sich das Hochwasserge schehen der Glatt der letzten 100 Jahre über blicken.

Üblicherweise erlaubt eine solche Datengrundlage die Abschätzung eines 100-jährlichen Hochwassers. Die enorme Zunahme der versiegelten Flächen im Einzugs gebiet der Glatt erlaubt aber keine einfache Extrapolation in die Zukunft. Wie sich diese Zunahme auf die Abflüsse auswirkt, lässt sich nur beurteilen, wenn die massgebenden hochwasserbildenden Prozesse verstanden werden. Dabei spielt die Einstufung der Abflussbereitschaft der Siedlungsflächen eine Schlüsselrolle.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass die expandierten Siedlungsflächen in Zürich-Nord das Abflussverhalten der Glatt nicht grundsätzlich modifizieren. Ein wichtiger Grund dafür im dezentralen Rückhalt von Niederschlagswasser auf Strassen, Plätzen, Flachdächern, Grünanlagen usw. liegen. Einen zweiten Grund bilden die mangelnden Kenntnisse über Grösse und Verlauf von Starkniederschlagszellen. Bei beiden Gebieten besteht ein grosser For schungsbedarf.

Mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell Q_{AREA} , das die Abflussreaktion natürlicher und versiegelter Flächen berücksichtigt, wurden verschiedene Niederschlagsszenarien durchgerechnet. Dabei zeigte es sich, dass Gewitterzellen von kurzer Dauer über dem Gebiet Zürich-Nord weniger kritisch sind als ausgedehnte, ergiebige Starkniederschläge, die einen wesentlichen Teil des Einzugsgebiets abdecken. Die seit 1968 zusätzlich ver siegelten Flächen von rund 30 km^2 verursachten eine relativ bescheidene Erhöhung des Abflusses von $32 \text{ m}^3/\text{s}$ oder ca. $1 \text{ m}^3/\text{s}$ pro km^2 versiegelter Fläche.

In der hier vorgestellten Untersuchung wurden neben den Niederschlags und Abflussdaten weitere Datenquellen (Erkenntnisse über historische Hochwasser, Radarmessungen des Niederschlags, hydraulische Nachrechnungen von Wasserstän den, Veränderungen im Einzugsgebiet, Erhe bungen über Abflussprozesse usw.) genutzt, um ein räumlich detailliertes, prozessnahe Niederschlag-Abfluss-Modell aufzubauen. Dank diesem Modell konnten die Auswirkun gen der rasanten Siedlungsentwicklung im

Glatteinzugsgebiet auf den Abfluss auf gezeigt und quantifiziert werden.

Diese Vorgehensweise lässt sich aber auch auf andere hydrologische Fragestellungen übertragen. Sie erlaubte es, die Wirkung der ausgedehnten Karstflächen im Muotatal bei aussergewöhnlichen Niederschlagsereignissen zu quantifizieren. Auch die extreme Reaktion des Dorfbachs von Schwarzenburg auf ein Gewitter in Jahre 1985 konnte so entschlüsselt werden. Diese interessanten Anwendungen sollen in einem späteren Artikel vorgestellt werden.

Dank

Die Studie wurde im Auftrag des Amtes für Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich durchgeführt. Die Autoren danken dem AWEL für die gute Unterstützung und Zusammenarbeit.

Literatur

- Naef F., Scherrer S., Faeh A. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser, Schlussbericht NFP31, vdf-Verlag.
- Grebner D., Roesch Th., Schwab M. (1998): Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Blatt 2.5.
- Scherrer S. (1996): Abflussbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge, Diss., ETH Nr. 11793, Zürich (VAW Mitteilung Nr. 147).
- Scherrer AG/Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft ETH Zürich (2002): Der Einfluss der Siedlungsentwicklung auf die extremen Hochwasser der Glatt. Bericht im Auftrag des AWEL Kt. Zürich.
- Verein Schweizerischer Abwasserfachleute, VSA (1989): Genereller Entwässerungsplan (GEP), Richtlinie für die Bearbeitung und Honorierung.

Anchrift der Verfasser

Dr. Felix Naef, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, naef@ihw.baug.ethz.ch

Dr. Simon Scherrer, Roger Frauchiger, Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, CH-4153 Reinach, info@scherrer-hydrolog.ch