

Untersuchung von Hochwassergefahren in kleinen Einzugsgebieten

Gernot Ebert und Donat Job

Zusammenfassung

Die beschriebenen Erfahrungen aus der Praxis der Hochwassergefahrenkartierung beruhen auf Projektbearbeitungen an kleinen Fliessgewässern in der Schweiz. Vom kantonalen Auftraggeber wurde eine parzellenscharfe Abgrenzung der Gefahrenbereiche verlangt. An sehr kleinen Fliessgewässern gibt es in der Regel jedoch weder Abflussmesspegel zur Kalibrierung der hydrologischen Modelle noch terrestrische Vermessungsdaten der Bachprofile für eine hydraulische Berechnung.

Um das geforderte Qualitätsziel zu erreichen, wurde zunächst eine Schwachstellenanalyse durchgeführt, die durch Ortsbegehungen ergänzt wurde. Dabei wurden hydraulische Engstellen und verklausungsgefährdete Bauwerke identifiziert. Bei der anschliessenden hydrologischen Berechnung der Hochwasserabflüsse für alle massgebenden Punkte mit dem Modell HA-KESCH des schweizerischen Bundesamts für Umwelt (BAFU) konnte eine flächendeckend vorhandene Kartierung der Abflussprozesse herangezogen werden.

Zur Ermittlung der Überschwemmungsflächen wurde jede hydraulische Schwachstelle (z.B. vollständige Verklausung eines Durchlasses) separat betrachtet. Für jede Ausuferung wurde die resultierende Überschwemmungsfläche GIS-gestützt mittels des 2m-Raster-Höhenmodells (Laserscan-DGM) als Wassertiefen-Grid berechnet. Durch Überlagerung aller Einzelflächen mit dem Max-Kriterium wurde für jedes Gewässer pro Szenario ein zusammenhängendes Fliess-tiefen-Grid erzeugt. Vor der weiteren Bearbeitung wurden die berechneten Überschwemmungsflächen selektiv durch Ortsbegehungen überprüft, da Mauern und andere bauliche Kleinstrukturen im Laserscan-DGM nicht repräsentiert sind.

Zur Herstellung der Wassertiefenkarten und der Hochwassergefahrenkarten wurden die Fliess-tiefen-Rasterdaten in Polygone umgewandelt und gemäss Pflichtenheft attribuiert. Dieser komplexe und mehrstufige Prozess konnte nur teilautomatisiert mit Hilfe eines Geodatenmodells (Model Builder) bewältigt werden, um topologisch einwandfreie Ergebnisse zu erhalten.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der seit den 1990er Jahren gehäuft auftretenden schweren Hochwasserereignisse waren europaweit Untersuchungsprogramme angestossen worden, welche systematisch die Grundlagen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes schaffen sollen. Die Ausarbeitung von Hochwassergefahrenkarten ist dabei einer der wichtigsten Schritte. Aktuell ist in vielen Ländern die Bearbeitung der Gefahrenkartierung weit fortgeschritten, wobei grosse Fliessgewässer vorrangig behandelt wurden und werden.

In den EU-Staaten ist die Grundlage hierfür in Artikel 6 der Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken formuliert und wurde von den Mitgliedsstaaten entsprechend in nationales Recht übernommen. In der Schweiz ist die Verpflichtung der Kantone zur Erstellung von Gefahrenkarten in der Wasserbauverordnung (WBV) des Bundes geregelt.

Es besteht weiterhin Bedarf bei der Bearbeitung kleiner und kleinster Einzugsgebiete, denn auch von kleinen Fliessgewässern können im Mittelgebirge und im alpinen Raum beträchtliche Gefahren ausgehen. Aufgrund der hohen Abflussdynamik mit grossen Unterschieden zwischen Normalabfluss und Hochwasser und der Schwemmholzproblematik sind hier häufig punktuelle Schwachstellen wie Verklausungen an Durchlässen eine Ursache für Überflutungen.

Die hier beschriebenen Erfahrungen aus der Praxis beruhen auf Projektbearbeitungen in der Schweiz und werden am Beispiel des Projekts „Gefahrenkartierung Naturgefahren im Kanton Zürich“ erläutert. Vom Auftraggeber wurde eine parzellenscharfe Abgrenzung der Gefahrenbereiche verlangt. Gemäss Pflichtenheft gingen die Erwartungen so weit, dass bei überschwemmten Strassen klar ersichtlich sein soll, ob „angrenzende Grundstücke ebenfalls betroffen“ sind.

Zur Berechnung der Überschwemmungsflächen können jedoch an kleinen Fliessgewässern in der Regel mangels detaillierter Vermessungs- und Pegeldata keine aufwändigen hydrologischen und hydraulischen Modelle aufgestellt werden. In flächendeckend vorhandenen Höhen- und Pegeldata wie dem 2 m-Raster-Höhenmodell, das auf Laserscan-Befliegungen basiert, sind bauliche Kleinstrukturen wie Gartenmauern, Bordsteine oder kleinere Geländekanten dagegen nicht repräsentiert. Kleine Bäche bilden sich im Höhenraster nur als unvollkommene Mulde ab, kleinste Bäche sind in der Regel in diesen Datensätzen oft überhaupt nicht erkennbar.

Wenn bei der Untersuchung von Hochwassergefahren an grossen Fliessgewässern keine oder keine ausreichend genauen terrestrischen Vermessungsdaten vorliegen, können sie meist im Rahmen des Budgets für die Untersuchung erhoben werden. Bei sehr kleinen Fliessgewässern ist dieses Budget in der Regel nicht vorhanden, sehr wohl aber die Erwartungen an die Verlässlichkeit der Ergebnisse.

Wie kann das Qualitätsziel mit einfachen, aber trotzdem möglichst genauen und effizienten Arbeitsmethoden erreicht werden? Nachfolgend wird die Vorgehensweise für den Hauptprozess Hochwasser an den Seitengewässern beschrieben. Im Rahmen des Projekts wurde gemäss Pflichtenheft auch der Hauptprozess Massenbewegungen und die Hinweisprozesse Oberflächenabfluss, Ufererosion, Grundwasseraufstoss, Rückstau in die Kanalisation, Übermuring/ Übersarung sowie inaktive Rutschungen untersucht. Diese weiteren Aspekte werden hier nicht beschrieben.

2 Hydrologie

Für die Gefahrenkarte müssen in der Schweiz die Hochwasserabflüsse für das dreissigjährige Ereignis (HQ_{30}), das hundertjährige Ereignis (HQ_{100}), das dreihundertjährige Ereignis (HQ_{300}) sowie das Extremhochwasser (EHQ) festgelegt werden. Die Festlegung von Hochwasserabflüssen ist insbesondere bei kleineren Gewässern ohne Messstellen mit Unsicherheiten behaftet. Wo keine hydrologischen Studien vorliegen, wird im Rahmen der Gefahrenkartierung auf schweizweit anerkannte Schätzmethode abgestützt.

Die hergeleiteten Abflusswerte werden aufgrund von Ereignisdaten, Eigenschaften der Gewässereinzugsgebiete und von Kapazitätsüberlegungen verifiziert und so die Unsicherheitsbereiche entsprechend eingeschränkt.

Die festgelegten Hochwasserabflüsse müssen eine für die Gefahrenkartierung angemessene Genauigkeit aufweisen. Im Kanton Zürich sind bei zukünftigen wasserbaulichen Projekten

grundsätzlich die in der Gefahrenkarte festgelegten Hochwasserabflüsse zu verwenden, falls keine detaillierteren Abklärungen vorliegen.

Die Erfahrungen in der Schweiz zeigen dabei, dass es sinnvoll ist, bei der Hochwasserabschätzung zwischen mittelgrossen und kleinen Einzugsgebieten zu unterscheiden. Im vorliegenden Falle handelte es sich durchwegs um kleine Flächen $< 10 \text{ km}^2$. Für solche Gebiete erlaubt das vom BAFU herausgegebene Software-Paket HAKESCH eine effiziente Abschätzung der Hochwasserspitzen und Konzentrationszeiten mit fünf verschiedenen Verfahren.

Die Anwendung der Verfahren benötigt die Eingabe hydrologischer Parameter, welche naturgemäss in engem Zusammenhang mit der Topographie und Bodenbeschaffenheit stehen. Es handelt sich dabei um Gerinnelängen, Neigungen, Isochronen, Einzugsgebietsflächen, Höhendifferenzen, sowie Flächen verschiedener Oberflächenbeschaffenheit.

Eine wertvolle Grundlage zur Bestimmung der Abflussbeiwerte stellte die Abflussprozesskarte des Kantons Zürich dar, welche auf umfangreichen Bodenprofilen beruht. Sie enthält flächendeckend den jeweils gebiets-dominanten Abflusstyp. Die Verwendung der Abflussprozesskarte zur Ermittlung der Input-Daten in HAKESCH ist sinnvoll, da sie den Verzicht auf Bodenansprachen ermöglicht. Zudem entfällt die Unterscheidung von Gebieten mit und ohne Wald. Dadurch reduziert sich die für Feldbegehungen aufzuwendende Zeit deutlich.

Aufgrund von Empfehlungen des Kantons konnten den verschiedenen Abflusstypen die Abflussbeiwerte der verschiedenen Verfahren zugeordnet werden. Um effiziente und auch genaue Berechnungen zu ermöglichen, wurden die Beiwerte über spezielle Funktionen von ArcGIS ermittelt.

Die Einzugsgebietsabgrenzung erfolgte weitgehend automatisch in ArcGIS mit den Hydrologie-Tools der Erweiterung Spatial Analyst. Als Grundlage diente ein Laserscan-DGM im $2 \times 2 \text{ m}$ Raster.

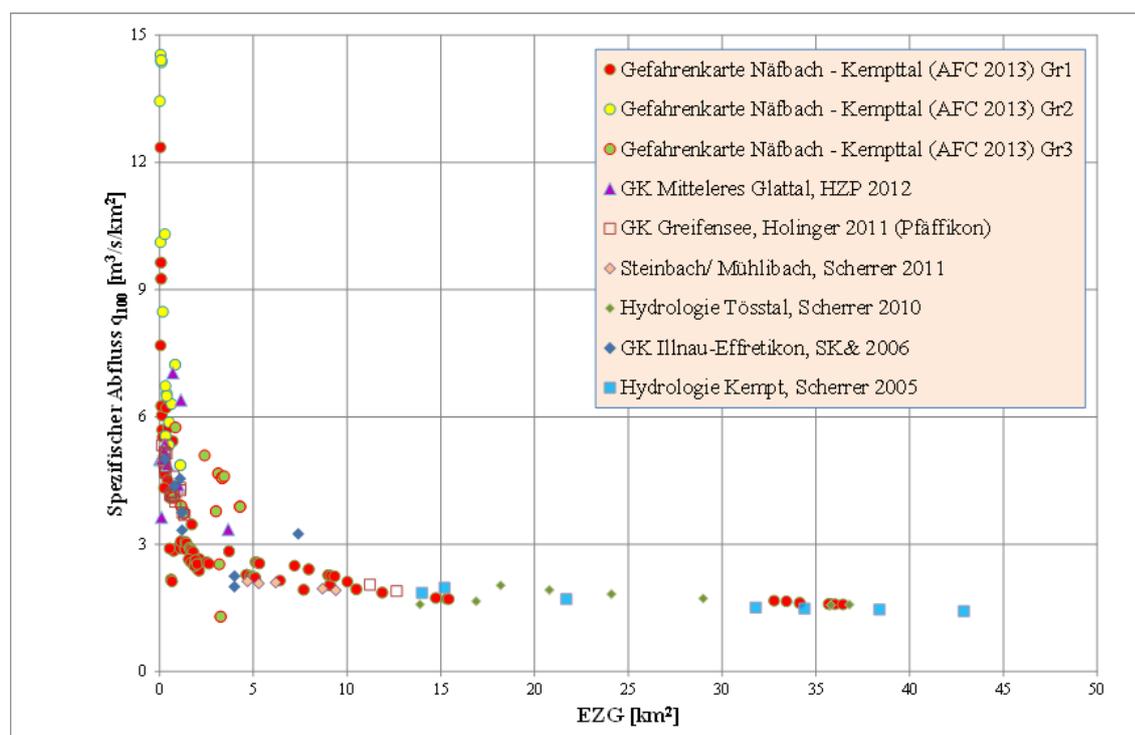


Abb. 1 Spezifische 100-jährliche Abflüsse im Projektgebiet

Die Hochwasserabschätzung wurde für 44 Einzugsgebiete an entsprechenden Bemessungspunkten durchgeführt. In der Regel wurde pro Seitenbach ein Punkt bei der Einmündung in einen Hauptbach definiert. Bei längeren Gewässern oder Änderung der Einzugsgebietscharakteristik wurden zwei oder mehrere Punkte gewählt. Die Bestimmung der Hochwasser für übrige Gerinne-punkte (potentielle Schwachstellen wie Durchlässe, Brücken etc.) erfolgte für hydrologisch sehr ähnliche Kleineinzugsgebiete via Skalierung über die Grösse des Einzugsgebietes.

Abb. 1 zeigt die spezifischen Abflüsse q_{100} in $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ für die untersuchten Gewässer im Rahmen der vorliegenden Gefahrenkarte im Vergleich zu verschiedenen vorhandenen Studien im Kanton Zürich. Dies erlaubt eine Übersicht sowie auch einen Vergleich und Plausibilisierung mit anderen, bereits bestehenden Hochwasserabschätzungen.

3 Schwachstellenanalyse

Zur Untersuchung der Hochwassergefahren an den kleinen Seitengewässern kam die Aufstellung durchgehender hydraulischer Modelle wegen der überwiegend nicht verfügbaren Querprofil-daten nicht in Frage. Um trotzdem innerhalb des vom Auftraggeber festgelegten Untersuchungsgebiets („Perimeter“) alle relevanten Punkte zu erfassen, wurde eine Analyse der punktuellen Schwachstellen durchgeführt, an denen es bei Hochwasser zu Ausuferungen kommen kann. Diese können verursacht werden durch:

- Zu kleine Gerinnekapazität
- Überschreitung der Abflusskapazität an Brücken
- Überschreitung der Abflussleistung von Durchlässen
- Verklausungen durch Schwemmholtz an Brücken und Durchlässen
- Auflandung von transportiertem Geschiebe verkleinert den Abflussquerschnitt

Zur Identifizierung der Schwachstellen wurden zunächst vorhandene Unterlagen ausgewertet und bereits bekannte Schwachstellen in einem Ereigniskataster dokumentiert. Die generellen Entwässerungspläne der Gemeinden (GEP) enthalten für eine grössere Anzahl von kritischen Durchlässen und Gerinneabschnitten Information zu deren Geometrie. In den anschliessenden Ortsbegehungen wurden diese kritischen Stellen überprüft sowie weitere Schwachstellen aufgenommen und fotografiert (Beispiel in **Abb. 2**).



Abb. 2 Durchlass mit geringer Kapazität, verklausungsgefährdet

Wesentlicher Teil der Schwachstellenanalyse ist die Berechnung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Gerinne, Brücken und Durchlässe und ein Vergleich mit den Hochwasserabflusswerten aus der Hydrologie für die verschiedenen Eintrittswahrscheinlichkeiten.

Die hydraulischen Abflusskapazitäten in den kleinen Seitengerinnen wurden bei offenen Querschnitten mit der Formel von Manning-Strickler berechnet. Bei Durchlässen wurden hydraulische Berechnungen mit Berücksichtigung von Einlaufverlusten und Rohrreibung durchgeführt. Alle Kapazitätsberechnungen wurden ohne Freibord vorgenommen (Freibord = 0 cm).

Die Beurteilung der Schwachstellen erfolgte mit den festgelegten Hochwasserabflüssen gemäss Hydrologie. Für jede untersuchte Stelle wurde die berechnete Abflusskapazität mit den Hochwasserabflüssen HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300} und Extremhochwasser (EHQ) verglichen. Dabei blieben mögliche Wasserverluste durch oberhalb liegende Ausuferungen unberücksichtigt, so dass jede Schwachstelle mit dem unverminderten Hochwasserabfluss verglichen wurde (Bruttoprinzip).

Zur Berücksichtigung von möglichen Geschiebe-Auflandungen und Verklausungen wurden die Abflussquerschnitte je nach Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert oder als undurchlässig angenommen. **Abb. 3** zeigt diese Vorgehensweise für die Verklausung von Durchlässen.

Durchmesser [m]	Szenarien Verklausung - ohne Rechen
< 0.3	immer Verklausung ab HQ_{30}
0.3-0.6	Verklausung ab HQ_{100} , falls Schwemmholz relevant
0.6-1.0	Verklausung ab HQ_{300} , falls Schwemmholz relevant
>1.0	Verklausung ab EHQ, falls Schwemmholz relevant

Durchmesser [m]	Szenarien Verklausung - ungünstiger Rechen
< 0.6	immer Verklausung ab HQ_{30}
0.6-1.0	immer Verklausung ab HQ_{100}
>1.0	immer Verklausung ab HQ_{300}

Durchmesser [m]	Szenarien Verklausung - günstiger Rechen
< 0.3	immer Verklausung ab HQ_{30}
0.3-1.0	50% Verklausung ab HQ_{100} , falls Schwemmholz relevant Verklausung ab HQ_{300} , falls Schwemmholz relevant
> 1.0	Verklausung ab EHQ, falls Schwemmholz relevant

Abb. 3 Schema zur Berücksichtigung von Verklausungen an Durchlässen

Die Ergebnisse der Schwachstellenanalyse wurden in Tabellen und GIS-Karten dokumentiert. Als wesentliche Voraussetzung für den nächsten Schritt – die Berechnung der Überschwemmungsflächen – wurde für jede der rund 170 Schwachstellen bei HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300} und EHQ eine vereinfachte Hochwasserabflussganglinie ermittelt. Hierfür wurden mit den Abflussspitzen und Konzentrationszeiten aus der Hydrologie Dreiecksganglinien mit einer *Anstiegszeit* = t_c und einem abfallenden Ast von $2 \cdot t_c$ gebildet (**Abb. 4**), die jeweils um die (Rest-) Kapazität der zugehörigen Schwachstelle vermindert wurden.

Durch tabellarische Berechnung dieser Ganglinien sowie automatisierter Diskretisierung und Dateiausgabe über ein Excel-VBA-Makro konnte dieser Arbeitsschritt trotz der grossen Datenmenge rationell ausgeführt werden. Die erzeugten ASCII-Dateien konnten bei der Berechnung der Überschwemmungsflächen direkt eingelesen werden.

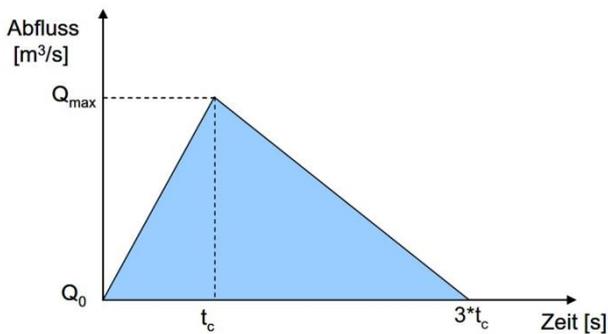


Abb. 4 Vereinfachte Hochwasserabflussganglinie

4 Überschwemmungsflächen

Grundgedanke bei der Ermittlung der Überschwemmungsflächen ist, dass an jeder Schwachstelle eine Wassermenge ausuferen kann, die unabhängig von anderen Ausuferungen ist. Eine Abminderung aufgrund von Wasserverlusten wird nicht angenommen.

Einerseits wird hiermit berücksichtigt, dass bei Hochwasser nicht zwangsläufig an jeder Schwachstelle Wasser austritt, weil beispielsweise nicht alle angenommenen Verkläuerungen tatsächlich entstehen. Andererseits wird dem Umstand Rechnung getragen, dass zur Verbesserung des Hochwasserschutzes im Lauf der Zeit Schwachstellen baulich beseitigt werden und damit unterhalb liegende, noch nicht beseitigte Schwachstellen mit der vollen Wassermenge belastet werden.

Somit musste an jeder der 170 Schwachstellen für jedes der vier Hochwasser-Szenarien eine Überschwemmungsfläche ermittelt werden. Aufgrund dieser grossen Menge musste eine systematische und rationelle Methode gefunden werden, die den Bearbeitungsaufwand in Grenzen hält und trotzdem möglichst zutreffende Ergebnisse liefert.

Die Überschwemmungsflächen wurden zellbasiert unter Verwendung des 2 m-Raster-Höhenmodells (Laserscan-DGM) mit der ArcGIS-Erweiterung „Flood Area“ berechnet. Diese Erweiterung ermöglicht es, an jeder beliebigen Stelle punktuell Abflussganglinien einzulesen, die sich bei der Berechnung über einen vereinfachten zweidimensionalen Ansatz auf der Oberfläche ausbreiten. Als Ergebnis der Berechnung wird ein Wassertiefen-GRID ausgegeben.

Um die einzeln berechneten Überschwemmungsflächen der Schwachstellen zu Gesamtflächen pro Gewässer und pro Szenario zusammenzufassen, wurden die GRIDs mit der MAX-Bedingung überlagert. Dadurch wurde bei Überlappungen die grösste Wassertiefe berücksichtigt (**Abb. 5**).

Das Laserscan-DGM wurde ohne weitere Einarbeitung von Bruchkanten oder baulichen Kleinstrukturen verwendet. Um trotzdem die Qualität der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die berechneten Überschwemmungsflächen-GRIDs zunächst GIS-gestützt und anschliessend durch selektive Ortsbegehungen überprüft. Bei den Ortsbegehungen wurden fragwürdige Flächenausdehnungen verifiziert, die nicht am Schreibtisch anhand von Flurkarten und Orthofotos plausibilisiert werden konnten.

Die Wassertiefenkarten wurden anschliessend durch weitere Verschneidungen und durch Anwendung einer schweizweit einheitlichen Gefahrstufen-Matrix aggregiert und daraus die endgültigen Gefahrenkarten Hochwasser erstellt.

Die im Jahr 2015 ins Internet gestellten Gefahrenkarten sind darüber hinaus eine synoptische Darstellung, in der die Hochwassergefahren mit den Gefahren durch Massenbewegungen wie Hangrutschungen verschnitten wurden (**Abb. 7**). Diese sind im GIS-Browser des Kantons Zürich (www.maps.zh.ch) unter „Naturgefahren“ öffentlich zugänglich.

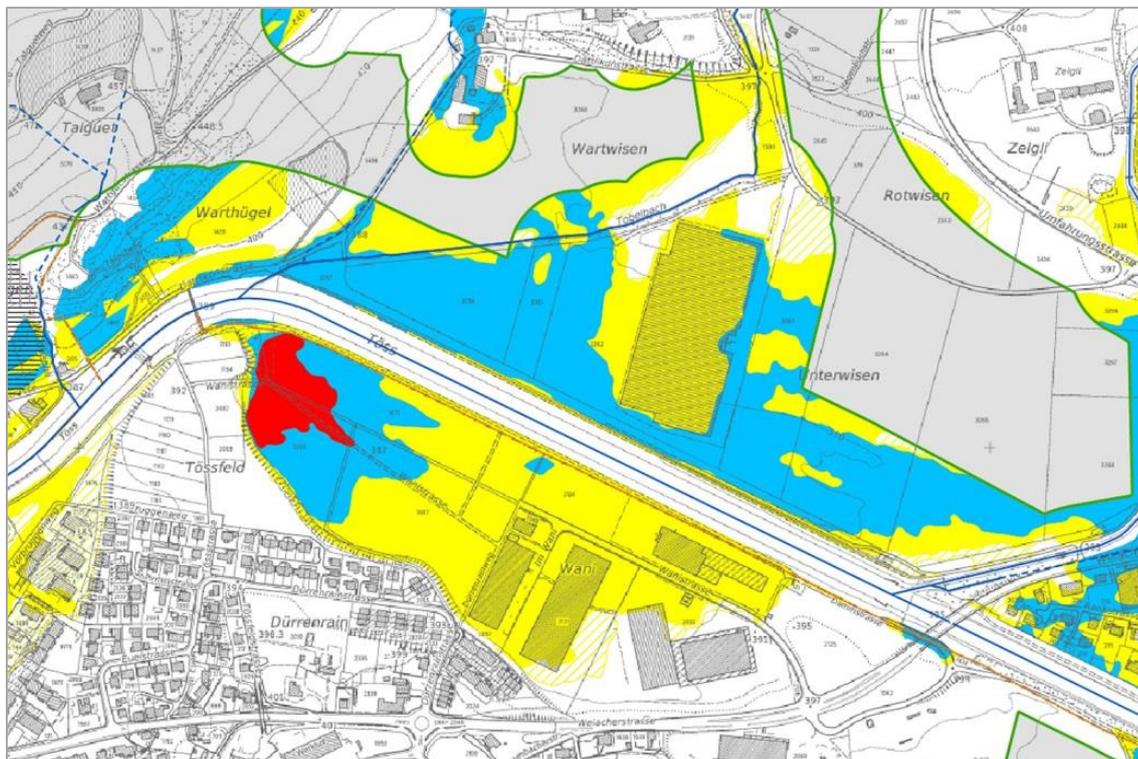


Abb. 7 Ausschnitt aus der Gefahrenkarte im Kanton Zürich

Literatur und Referenzen

- Dobmann, Judith (2009). Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 17. September 2009.
- BWG (2003). Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten - Praxishilfe. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Bern, 2003.
- Geomer GmbH, D-Heidelberg. Flood Area – Hydrodynamische Modellierung in ArcGIS zur Berechnung von Überschwemmungsflächen.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. (FH) Gernot Ebert
AF-Consult Switzerland AG
Täferenstrasse 26, CH-5405 Baden, Schweiz
gernot.ebert@afconsult.com

Dipl.-Ing. ETH Donat Job
AF-Consult Switzerland AG
Täferenstrasse 26, CH-5405 Baden, Schweiz
donat.job@afconsult.com