

# Mobile ortsbasierte Messung von Wasserständen zur Verbesserung der Hochwasservorhersage in kleinen Einzugsgebieten

Simon Burkard, Frank Fuchs-Kittowski

HTW Berlin, Berlin, Germany

{S.Burkard, Frank.Fuchs-Kittowski}@htw-berlin.de

**Abstract.** Flood forecasting is particularly difficult and uncertain for small drainage basins. One reason for that is the absence of adequate temporal and spatial hydrological input variables for model-based flood predictions. Incorporating additional information collected by volunteers with the help of their smartphones can improve flood forecasting systems. Data collected in this way is often referred to VGI data (Volunteered Geographic Information data). This paper discusses how VGI data can be incorporated into a flood forecasting system to support flood management in small drainage basins on the basis of mobile VGI data. It therefore outlines the main functional components involved in such VGI-based flood forecasting platform while presenting the component for mobile data acquisition (mobile sensing) in more detail. In this context, relevant measurement variables are first introduced and then suitable methods for recording these data with mobile devices are described. The focus of the paper lies on discussing various methods for measuring the water level using inbuilt smartphone sensors. For this purpose, three different image-based methods for measuring the water level at the banks of small rivers using a mobile device and the inbuilt orientation and camera sensors are explained in detail. It is shown that performing the measurements with the user's help via appropriate user interaction and utilizing known structures at the measuring points results in a rather robust image-based measurement of the water level. A preliminary evaluation of the methods under ideal conditions found that the developed measurement techniques can achieve both an accuracy and precision of approximately 1cm.

**Keywords:** VGI, Crowd sensing, Crowd sourcing, Mobile sensing, Water level, Flood forecasting

## 1 Verbesserung der Hochwasservorhersage in kleinen Einzugsgebieten durch Bürgerbeteiligung bei Datenerhebung

Hochwasser gehören zu den Naturgefahren, die die zivile Bevölkerung direkt bedrohen und regelmäßig große materielle Schäden verursachen. Die entstandenen Schäden haben dabei aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels und einer erhöhten Verwund-

barkeit (Vulnerabilität) in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen [1]. Es ist anzunehmen, dass dieser Trend anhalten und die Intensität von Hochwasser weiter zunehmen wird [2]. Im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements sind daher verlässliche und frühzeitige Vorhersage- und Frühwarnsysteme von großer Bedeutung, um zielgerichtete Schutzmaßnahmen zu ermöglichen [3]. Als Entscheidungsgrundlage für Maßnahmen des Katastrophenschutzes dienen dabei in der Regel hydrologische und hydraulische Prognosemodelle. Darauf basierende Hochwasservorhersagen sind allerdings meist unsicher und fehlerbehaftet. Gründe dafür sind Modellunsicherheiten, unsichere Niederschlagsvorhersagen sowie zeitlich und räumlich ungenügend vorhandene hydrologische Eingangsgrößen. Insbesondere für kleine Gewässer sind Vorhersagen schwierig, da oftmals eine sehr schnelle Gebietsreaktion erfolgt und daher nur sehr geringe Vorwarnzeiten verbleiben. Durch zusätzliche Informationen, z.B. zusätzliche Wasserstandsmessungen entlang des Flusses, können diese Datensätze erweitert und die Prognosemodelle aktualisiert werden, um somit die Vorhersageunsicherheiten zu verringern [4].

Mobiles Crowdsourcing – die Erfassung von Daten durch Freiwillige mittels ihrer eigenen, privaten mobilen Endgeräte (Smartphones, Tablets etc.) – erscheint als geeignetes Mittel, um solche zusätzlichen Eingangsdaten zu sammeln [5]. Oftmals werden die ortsbezogenen Daten, die Bürger freiwillig mittels ihrer mobilen Endgeräten und der darin eingebauten Sensoren sammeln und zur Nutzung bereitstellen, als VGI-Daten (*Volunteered Geographic Information*) bezeichnet [6-8]. Das Erfassen dieser Daten durch Freiwillige wäre dabei nicht mit Zusatzkosten verbunden. Eine kostenintensive Installation stationärer automatischer Messgeräte entfällt. Auf diese Weise kann eine räumliche und zeitliche Verdichtung von Eingangsinformationen erreicht werden, mit dem Potenzial, die Modellprognosen zu verbessern und den verantwortlichen Behörden somit eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Hochwasserschutzmaßnahmen zu liefern. Gleichzeitig werden durch die Einbeziehung der Bevölkerung in die Datenerhebung die Bürger verstärkt für Hochwassergefahren sensibilisiert. Die Bürger können somit aktiv dazu beitragen, die Hochwasservorhersage zu verbessern [9].

In diesem Beitrag sollen insbesondere verschiedene Methoden zur Messung des Wasserstandes unter Nutzung der in Smartphones integrierten Sensoren (Mobile Sensing) vorgestellt werden. Dabei wird auch beschrieben, wie diese Informationen in eine Hochwasserprognoseplattform eingebettet werden können, um das Hochwassermanagements in kleinen Einzugsgebieten auf Basis mobiler VGI-Daten zu unterstützen.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: Nach einem kurzen Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 2) wird die konzeptionelle Architektur einer solchen VGI-basierten Hochwassermanagementplattform skizziert und die beteiligten Funktionskomponenten kurz beschrieben (Kapitel 3). Die Komponente zur mobilen Datenerfassung (*Mobile Sensing*) wird danach detaillierter präsentiert. Dazu werden zunächst relevante hydrologische Messgrößen vorgestellt und geeignete mobile Messmethoden beschrieben (Kapitel 4). Verschiedene Methoden zur Messung des Wasserstandes unter Nutzung der in Smartphones integrierten Sensoren – insbesondere drei verschiedene bildbasierte Messverfahren - werden anschließend im Detail erläutert sowie evaluiert und bewertet (Kapitel 5). Eine abschließende Zusammenfassung bietet einen Ausblick auf künftige Entwicklungen im Rahmen der vorgestellten Plattform (Kapitel 6).

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Mobiles Crowdsourcing und VGI im Katastrophenschutz

Beim mobilen Crowdsourcing werden mobile Endgeräte für die Sammlung von Daten sowie für die Koordination der an der Datensammlung freiwillig Beteiligten eingesetzt. Die Kernidee beim mobilen Crowdsourcing ist, dass normale Bürger befähigt werden, Daten über sich und die sie umgebende Umwelt mit ihren eigenen mobilen Endgeräten zu sammeln und zu teilen. Die Beteiligten tragen die Daten freiwillig, zu ihrem eigenen Nutzen oder zum Nutzer einer Gemeinschaft (Community) bei. Dabei wird keine aufgabenspezifische Spezialhardware verwendet, sondern normale, für den Massenmarkt verfügbare mobile Endgeräte, wie Smartphones und Tablets [5]. Die Daten werden meist erfasst mit Hilfe der Sensoren, die in den mobilen Endgeräten eingebaut sind (Mobile Sensing). Freiwillige können für die Datenerfassung proaktiv beauftragt und deren Aufgaben koordiniert werden (Mobile Tasking [10,11]). Oft handelt es sich bei den aufgenommenen Daten um orts- oder raumbezogene, häufig auch zeitbezogene Messwerte oder Informationen. Diese können auch als Volunteered Geographic Information (VGI) bezeichnet werden [6].

Eng verwandt mit den Begriffen des Mobiles Crowdsourcing und der Volunteered Geographic Information sind Konzepte wie Public Participatory GIS (PPGI [12]) und Participatory Sensing (PS [13]). Allen Konzepten gemeinsam ist der freiwillige und gemeinschaftliche Charakter des Datenerfassungs- und Datenteilungsprozesses.

Es sind bereits viele unterschiedliche mobile Crowdsourcing-Anwendungen bekannt, insb. im Natur-, Umwelt- und Katastrophenschutz [5]. Im Katastrophenschutz kann mobiles Crowdsourcing effektiv unterstützend während und nach einer Katastrophe eingesetzt werden [11, 14]. Beispielsweise können während einer Katastrophe die Bewohner sowie Rettungs- und Einsatzkräfte in einem Katastrophengebiet Informationen über die aktuelle Lage sammeln, so dass Hilfs- und Rettungskräfte gezielter eingesetzt werden können. Nach einer Natur-Katastrophe (wie Hochwasser, Sturm, Starkregen) ist bspw. das Finden, Dokumentieren und Bewerten von Schäden (wie umgeknickte Bäume, überflutete Wege oder umgeknickte Strommasten) eine wichtige Aufgabe, um die begrenzten Ressourcen gezielter und schneller für die Reparatur und Schadensbehebung einsetzen zu können, sowie die tatsächlich aufgetretenen Schäden aktueller und umfassender auswerten zu können [15].

Mobile Crowdsourcing-Anwendungen wurden bereits mehrfach erfolgreich in Katastrophensituationen eingesetzt, in denen allerdings die Genauigkeit und Qualität der Informationen von untergeordneter Bedeutung war. VGI-Daten kamen so beispielsweise bei Flutkatastrophen und Überschwemmungen zum Einsatz [16-18], bei Flächenbränden [19], Erdbeben [20], oder auch bei schweren Stürmen [21]. In dem in Kapitel 3 präsentierten System sollen VGI-Daten unter anderem zur Aktualisierung und Validierung von Prognosemodellen eingesetzt werden. Ein stärkerer Fokus liegt daher hier auf der Genauigkeit und Qualität der erhobenen Daten mittels Methoden der mobilen Datenerfassung.

## 2.2 Durchflussmessung und Mobile Sensing zur Hochwasservorhersage

Zum Zweck der Hochwasservorhersage sind insbesondere hydrologische Daten von Bedeutung, welche zur Messung des Durchflusses genutzt werden können. Durchflussmessungen sind in der Hydrometrie meist indirekt und basieren bei bekanntem Flussquerschnittsprofil auf Messungen der Fließgeschwindigkeit und des Wasserstandes [22]. Ansätze zur automatischen Messung von Durchflüssen anhand von Bildaufnahmen existieren bereits. Diese basieren beispielsweise auf Fernerkundungsmethoden, mit welchen mittels Luftaufnahmen der Wasserstand in einem Gewässer abgeschätzt werden kann [23]. Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung von fest installierten Kameras zur bildbasierten Messung des Wasserstandes anhand von Markern oder Lattenpegeln [24-27]. Auch der Versuch, den aktuellen Wasserstand an analogen Lattenpegeln durch Passanten manuell ablesen zu lassen, wurde erfolgreich getestet. Der Wasserstand wird dabei per SMS [22] oder über eine mobile App [9] zur Auswertung an Datenserver gesendet.

Eine mobile Erfassung der Daten durch die Nutzer muss allerdings nicht zwangsläufig über die manuelle Eingabe der Daten in das mobile Endgerät erfolgen, z.B. in ein Formular, sondern ist auch automatisiert über in das Gerät bereits eingebaute Sensoren möglich. Für die Erfassung und Erzeugung von Daten durch die Nutzer mit den in ihren eigenen mobilen Geräten eingebauten oder verbundenen Sensoren hat sich der Begriff „Mobiles Sensing“ etabliert [5].

Eine mobile Sensing-Anwendung speziell zur automatischen bildbasierten Pegelüberwachung wurde von KISTERS entwickelt [29]. Zur robusten Messung erfordert diese allerdings spezielle Pegellatten sowie ideale sonstige Rahmenbedingungen wie ausreichend Helligkeit und eine geringe Entfernung zwischen Kamera und Pegellatte.

Die sensorbasierte Bestimmung von Wasserstandlinien mittels mobiler Geräte kann durch die Kenntnis der genauen eigenen Position im 3D-Raum erleichtert werden. Daher sind auch Forschungsbereiche der Mobile Augmented Reality und des mobilen 3D Tracking zur Positionsbestimmung von Interesse. Diese Forschungszweige sind noch relativ neu, allerdings existieren bereits mehrere Ansätze und Technologien zur bildbasierten Schätzung der eigenen Position im 3D Raum, welche hinsichtlich Genauigkeit die Lokalisierung mittels GPS-Signal übertreffen [30]. Existierende Anwendungen, die solche Technologien zur VGI-basierten Bestimmung hydrologischer Daten einsetzen, sind jedoch aktuell nicht bekannt.

Während es zahlreiche mobile Anwendungen für die Information über aktuelle Wasserstände an Gewässern gibt (z.B. Pegel<sup>1</sup>, Pegelstand<sup>2</sup>, Pegel-Online<sup>3</sup>, Pegelstände<sup>4</sup>, Meine Pegel<sup>5</sup>), existieren nur sehr wenige mobile Apps für die Erfassung der Pegelstände durch seine Nutzer. Bspw. wurden im Forschungsprojekt MAGUN mobile Anwendungen für die Erfassung aktueller Wasserstände und historischer Hochwassermarken entwickelt [31], welche aber nicht flächendeckend eingesetzt werden. Das Projekt

---

<sup>1</sup> <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.posts.Pegel>

<sup>2</sup> <https://play.google.com/store/apps/details?id=info.pegelstand.pegelstandnoebasic>

<sup>3</sup> <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.cirrus.mobi.pegel>

<sup>4</sup> [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lifestream\\_creations.pegelmelder](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lifestream_creations.pegelmelder)

<sup>5</sup> <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.hochwasserzentralen.app&hl=de>

WeSenseIt hat sich zum Ziel gesetzt, eine vollständige Plattform zur bürgerbasierten Dokumentation und Beobachtung von Wasserständen und Überschwemmungen zu konzipieren und zu testen [32, 33]. Smartphones sowie diverse sonstige kostengünstige Sensoren sollen dabei zur Messung von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit hydrologischer Daten eingesetzt werden. Angaben zur Robustheit und Qualität der gemessenen Daten sind nicht dokumentiert. In dieser Plattform sind die gemessenen Daten zudem nicht zur unmittelbaren Einbettung in ein Prognosemodell bestimmt, d.h. eine Integration der Daten oder Prozesse in konkrete Einsatzszenarien – wie Hochwassermanagement – fehlt.

### 3 Konzeptionelle Architektur eines VGI-basierten Prognosesystems

In diesem Abschnitt soll die konzeptionelle Architektur eines VGI-basierten Hochwasserprognosesystems präsentiert werden. Neben einem angepassten, klassischen Hochwasserprognosesystem und einer zentralen Hochwassermanagementsoftware zählen insbesondere Komponenten zum Mobile Tasking und Mobile Sensing zu den notwendigen funktionalen Komponenten einer solchen Plattform (Abbildung 1).

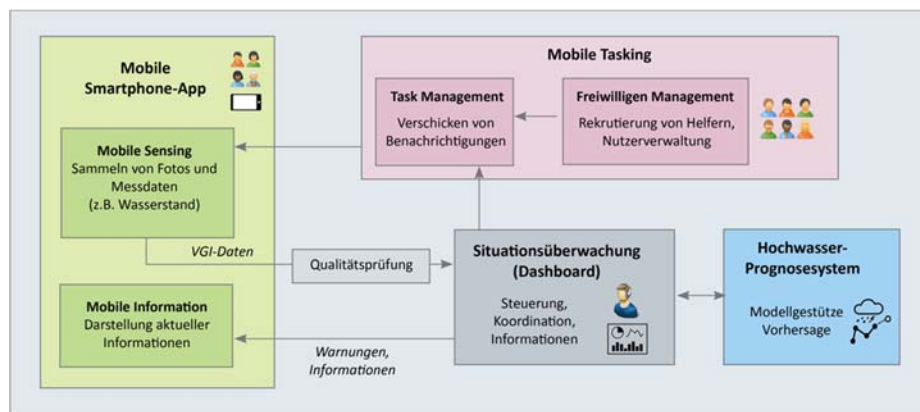


Abb. 1. Konzeptionelle Architektur einer VGI-basierten Hochwasserprognoseplattform.

#### 3.1 Mobile Tasking und Mobile Smartphone-Anwendung

Freiwillige Helfer sollen die Möglichkeit haben, selbstständig zu entscheiden, ob und in welcher Form sie Messdaten aufnehmen und bereitstellen wollen. Mit Hilfe von Mitteilungen auf ihr Smartphone können sie zusätzlich benachrichtigt und beauftragt werden, Messdaten an geeigneten Zeitpunkten aufzunehmen und zu übermitteln (Mobile Tasking). Diese Benachrichtigungen können manuell erstellt und gesendet werden, aber auch basierend auf einem Automatismus verschickt werden, welcher an ein Vorwarnsystem gekoppelt ist. So können Helfer beispielsweise automatisch benachrichtigt

und zum Sammeln von Messdaten beauftragt werden, wenn Starkregen und potenzielles Hochwasser vorhergesagt werden.

Innerhalb des Einzugsgebiets werden schließlich mittels einer Smartphone-Anwendung hydrologische Daten gemessen (Mobile Sensing). Über das mobile Handydaten-netz bzw. mittels WLAN können die gemessenen Daten anschließend an eine zentrale Serverplattform zur weiteren Verarbeitung übermittelt werden.

Zur Messung sollen idealerweise die im Gerät integrierten Sensoren genutzt werden. Dazu zählen GPS-Sensoren zur groben Positionsbestimmung, aber auch Neigungssensoren des Geräts (Kompass, Beschleunigungssensoren, Magnetometer) zur Bestimmung der Blickrichtung des Geräts sowie die im Smartphone integrierte Kamera zur Bildaufnahme. Der Einsatz dieser Sensoren, insbesondere zur Messung von Wasserständen, wird im Kapitel 4 und Kapitel 5 genauer erläutert.

Neben der Funktionalität zur Aufnahme und Übertragung von nutzergenerierten Messdaten soll die mobile Anwendung den Nutzern auch relevante Hochwasserinformationen zur Verfügung stellen. Mit Hilfe von Hochwassergefahrenkarten und der Darstellung aktueller Wasserpegel im Gebiet können sich die Nutzer auf diese Weise über Hochwassergefahren und die aktuelle Hochwasserlage informieren.

### **3.2 Modelgestütztes Hochwasservorhersagesystem**

Eine Problematik von nutzergenerierten Daten besteht darin, dass die Qualität und die Genauigkeit der aufgenommenen Daten stark schwanken können. Bevor die gemessenen hydrologischen Daten letztlich als Eingangsgrößen dem Prognosesystem zur Verfügung gestellt werden, ist daher eine automatische Qualitäts- und Plausibilitätsprüfung der eingehenden Daten notwendig. Durch einen gegenseitigen räumlichen und zeitlichen Abgleich der VGI-Datensätze können dabei fehlerhafte Eingangsdaten identifiziert und eliminiert werden. Aufbauend auf einem klassischen modellgestützten Vorhersagesystem kann das Prognosesystem anschließend mittels der verfügbaren VGI-Daten das zugrundeliegende Modell ergänzen bzw. validieren und optimieren sowie schließlich eine verbesserte Hochwasservorhersage liefern.

### **3.3 Situationsüberwachung**

Eine webbasierte Nutzeroberfläche (Dashboard) dient zur Situationsüberwachung. Eingehenden Messdaten der freiwilligen Helfer und prognostizierten Hochwasserdaten werden dort aufbereitet und in geeigneter Form visualisiert, um eine effektive Beurteilung der Hochwassersituation zu ermöglichen. Neben der kartenbasierten Darstellung und Auflistung aktueller und historischer VGI-Messdaten und Fotoaufnahmen werden dort auch die Ganglinien der Hochwasserpegel sowie offizielle meteorologische Daten wie Radarbilder zur Niederschlagsvorhersage dargestellt. Sobald das Prognosesystem, beispielsweise aufgrund vorhergesagter Starkniederschläge im Einzugsgebiet, eine mögliche Hochwassergefahr prognostiziert, werden entsprechende Warnhinweise auf der Nutzeroberfläche auffällig platziert.

#### 4 Mobile Sensing – Relevante Messgrößen und Messmethoden

Mit Hilfe der mobilen Smartphone-Anwendung können bestimmte Messparameter von Freiwilligen gemessen und der Plattform zur Verfügung gestellt werden. Relevante Messparameter sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Auswahl der letztendlich realisierbaren Messgrößen ergibt sich aus einer Abwägung zwischen den Parametern, die einen Mehrgewinn für das hydrologische Prognosemodell bieten und der technischen Realisierbarkeit von robusten mobilen Messmethode für diese Parameter.

Der Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit des Gewässers an definierten Messstellen sind entscheidende Eingangsgrößen für das hydrologische Prognosesystem, da beide Messgrößen für die unmittelbare Messung des Durchflusses relevant sind. Eine aussagekräftige Messung der Fließgeschwindigkeit ist allerdings mittels einer rein Smartphone-basierten Messung sehr schwierig. Eine grobe manuelle Schätzung der Fließgeschwindigkeit des Gewässers durch den Nutzer ist zwar möglich (z.B. Angabe „Fluss fließt sehr schnell“ oder „Fluss fließt nur sehr langsam“). Eine solche Angabe der Geschwindigkeit ohne physikalische Maßeinheit (z.B. Meter pro Sekunde) ist allerdings als Eingangsgröße für das Prognosesystem nicht sinnvoll. Auch eine bildbasierte Schätzung mittels Smartphone-Kamera wäre denkbar [35]. Ein derartiger Ansatz ist jedoch recht aufwändig und erfordert eine im Vorfeld bekannte feste Aufnahme-position sowie ideale äußere Aufnahmebedingungen (z.B. ideale Lichtverhältnisse). Außerdem kann dadurch lediglich eine grobe Schätzung der Fließgeschwindigkeit an der Oberfläche erfolgen, nicht aber für Strömungen unterhalb der Wasseroberfläche. Zur mobilen Messung des Wasserstandes hingegen existieren mehrere Ansätze. Diese Möglichkeiten der Wasserstandmessung werden im anschließenden Kapitel 5 ausführlich vorgestellt.






Messgrößen	Manuelle Messung	Automatische Messung
 <b>Wasserstand</b>	Schätzung oder Ablesen analoger Messpegel	IMU-basierte oder bildbasierte Erkennung (mit/ohne Nutzerinteraktion)
 <b>Fließgeschwindigkeit</b>	Grobe Schätzung („schnell“, „langsam“)	Bildbasierte Messung der Oberflächenfließgeschwindigkeit
 <b>Niederschlagsintensität</b>	Grobe Schätzung („regnet nicht“, „regnet leicht“, „regnet stark“)	Bildbasierte Schätzung oder Wetterstationen mit Regensensor
 <b>Schneehöhe</b>	Grobe Schätzung	
 <b>Fotos &amp; Videos</b> (Wasserstände, Hochwasserschäden, Ausuferungen etc.)		Aufnahme mittels Smartphone-Kamera; Grobe Positionsbestimmung mittels GPS-Sensor

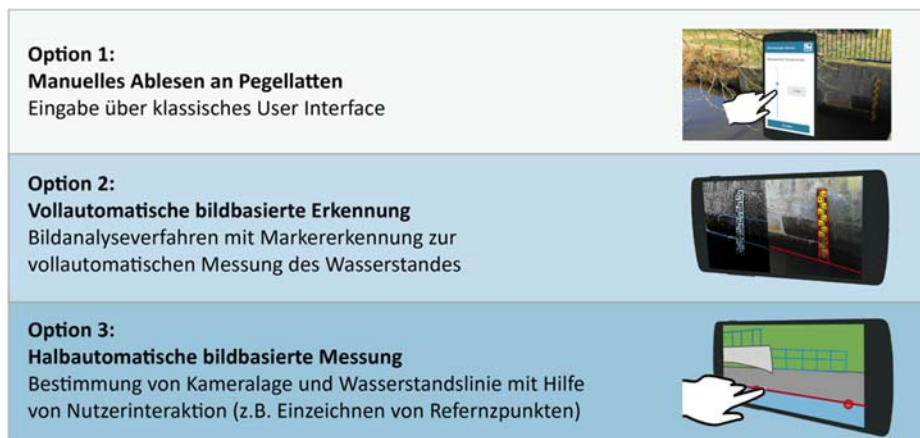
Abb. 2. Relevante Messgröße und mögliche Messverfahren.

Weitere relevante Eingangsgrößen für die modellgestützte Hochwasservorhersage sind die aktuelle Niederschlagsintensität und die Schneehöhe. Für beide Parameter sind automatische robuste Messmethoden mittels Smartphone schwierig umzusetzen. Zwar ist eine bildbasierte Schätzung der aktuellen Regenintensität möglich [36], allerdings wäre das Ergebnis der Schätzung oft fehlerhaft. Stattdessen soll eine manuelle Schätzung der Niederschlagsintensität durch die App-Nutzer erfolgen. Allein die grobe Schätzung der Intensität („es regnet nicht“; „es regnet leicht“; „es regnet stark“), verbunden mit dem per GPS-Signal ermittelten Standort des Nutzers ist hilfreich zur angestrebten verbesserten Lokalisierung von Starkniederschlagszellen.

Auch die Schneehöhe soll lediglich durch grobe Schätzung durch die Nutzer ermittelt werden. Die grobe Kenntnis der Schneeverhältnisse mit hoher räumlicher Auflösung ermöglicht somit eine Schätzung des Wasservorrats der Schneedecke im Einzugsgebiet. Als Eingangsparameter für das Vorhersagemodell kann diese Schätzung von großem Nutzen sein.

Neben diesen quantitativ messbaren Größen können außerdem Foto- und kurze Videoaufnahmen mittels der im Smartphone integrierten Kamera erfolgen. Diese Aufnahmen können auf dem Hochwasser-Dashboard kartenbasiert dargestellt werden und unterstützen die Einsatzkräfte bei der Beurteilung und Dokumentation der Hochwassersituation vor Ort. Auf diese Weise können auch gemessene Wasserstände durch zusätzliche Bilder erweitert werden. Außerdem kann diese Funktion zur Meldung und Lokalisierung von Ausuferungen oder Hochwasserschäden eingesetzt werden. Nutzer können somit zum Beispiel an neuralgischen Schlüsselstellen im Hochwasserfall überprüfen, ob es zu einer Ausuferung kam, und mittels Bildaufnahme das Ausmaß der Ausuferung übermitteln und dokumentieren.

## 5 Methoden zur Messung des Wasserstandes



**Abb. 3.** Ansätze zur Messung des Wasserstandes mittels mobilem Endgerät



Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung der Mobile Sensing-Komponente liegt in der Implementierung von geeigneten Methoden zur Smartphone-basierten Messung des Wasserstandes. Die Messung von Wasserständen soll dabei nicht an beliebigen Stellen entlang des Gewässers, sondern an bestimmten zuvor festgelegten Messstandorten (z.B. Brücken) erfolgen. Hierfür sind verschiedenartige Messmethoden denkbar (siehe Abbildung 3). Die Funktionsweise und die Eignung dieser Methoden soll im folgenden Kapitel genauer vorgestellt werden. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Präsentation und Evaluation von Methoden zur halbautomatischen bildbasierten Messung.

### **5.1 Manuelles Ablesen an Pegellatten**

Im einfachsten Fall kann die Messung des Wasserstandes erfolgen, indem der Nutzer diesen an einer vorhandenen kalibrierten Pegellatte abliest und den Wert über ein klassisches Interface (z.B. Texteingabefeld) in die Smartphone-Anwendung eingibt. Diese Methode ist recht robust: Der Messung erfolgt unabhängig von der im Smartphone integrierten Sensorik und wäre auch bei ungünstigen Lichtverhältnissen und Witterungsbedingungen möglich. Das Vorhandensein von entsprechenden sichtbaren und zugänglichen Pegellatten, welche am Messstandort kalibriert und befestigt wurden, ist allerdings hierfür Voraussetzung.

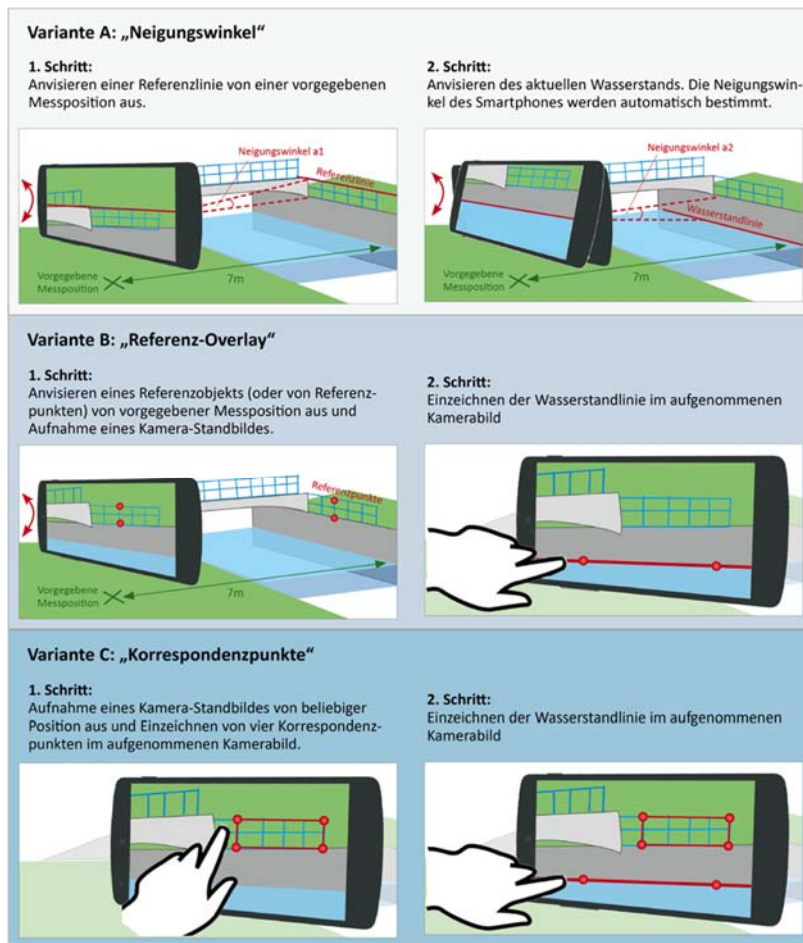
### **5.2 Vollautomatische bildbasierte Wasserstandmessung**

Als weitere Option der mobilen Wasserstandmessung ist eine vollautomatische bildbasierte Messmethode denkbar. Die generelle Idee dabei ist, dass nach Aufnahme eines Kamerabildes von variabler Messposition aus ein Bildanalysealgorithmus ohne weitere Nutzerhilfe automatisch den Wasserstand auf Basis des aufgenommenen Bildes bestimmt. Voraussetzung für die Umsetzung dieser Methode ist das Vorhandensein eines entsprechenden Markers. Dies kann eine gut sichtbare Pegellatte oder ein zusätzlicher künstlicher Marker sein. Mittels klassischen Bild- bzw. Texterkennungsalgorithmen kann somit der Marker bzw. die noch sichtbare Fläche des Markers bestimmt werden, um daraus die Lage der Wasserstandlinie zu erkennen und die Höhe des Wasserstandes zu bestimmen. Da das Aussehen der montierten Pegellatten bzw. künstlichen Marker im Vorfeld bekannt ist, können die Erkennungsalgorithmen für diesen speziellen Anwendungsfall mit Hilfe von Testbildern speziell trainiert und angepasst werden.

Ein derartiges vollautomatisches Verfahren kann unter idealen Voraussetzungen hohe Messgenauigkeiten ermöglichen, ist allerdings nicht immer ausreichend robust und oft sehr fehleranfällig. Insbesondere aufgrund der allgemeinen Lichtverhältnisse (z.B. Schattenwurf oder Dunkelheit) und der baulichen Begebenheiten vor Ort (z.B. Mauerbauwerke ohne markante Oberfläche) sind der Marker bzw. die Pegellatte oft nicht ausreichend sichtbar oder die Kante der Wasserstandlinie nicht stark genug ausgeprägt. Andere sichtbaren Texturen sind dann im aufgenommenen Kamerabild oft markanter abgebildet und stören die visuelle Marker-Erkennung bzw. Erkennung der Wasserstandlinie.

### 5.3 Halbautomatische bildbasierte Messung

Die genannten Schwierigkeiten der vollautomatischen bildbasierten Messung legen es daher nahe, andere bildbasierte Messverfahren zu entwickeln, welche eine robustere Wasserstandmessung ermöglichen.



**Abb. 4.** Messverfahren zur halbautomatischen bildbasierten Messung des Wasserstandes.

So können durch Mithilfe des Nutzers bei der Messdurchführung mittels entsprechender Nutzerinteraktion (z.B. durch das Einzeichnen von Punktreferenzen im Kamerabild) und unter Ausnutzung der bekannten örtlichen Begebenheiten an den Messstellen (z.B. vorhandenes Uferbauwerk) flexiblere und weniger fehleranfällige Messverfahren realisiert werden. Da die Messungen an vorgegebenen Messstandorten erfolgen und das Querschnittsprofil des Flusses an diesen Stellen ohnehin zur Durchflussberechnung vorab bekannt sein muss, kann vorausgesetzt werden, dass Abmessungen von vorhan-

denen Uferbauwerken an diesen Standorten (z.B. die Höhe und Breite eines Brückengeländers oder die Höhe einer Flussbegrenzungsmauer in Bezug auf das Flussbett bzw. Pegelnullpunkt) bekannt sind. Diese Kenntnis kann bei der Entwicklung von entsprechenden Messmethoden genutzt werden.

Im Folgenden werden drei unterschiedliche Methoden vorgestellt, welche unter den genannten Voraussetzungen und mit Hilfe der Smartphone-Kamera bzw. der im Smartphone verbauten Orientierungssensoren eine Messung des Wasserstandes ermöglichen. Die präsentierten Messmethoden wurden dabei so konzipiert, dass sie jeweils an die vor Ort an den Messstandorten vorherrschenden Rahmenbedingungen angepasst werden können. Auch die Festlegung bzw. variable Berechnung der Messposition (Nutzerpose), von welcher aus die Messung des Wasserstandes durchgeführt wird, spielt dabei eine große Rolle. In Abbildung 4 sind die drei Varianten grob skizziert.

**Variante A – Neigungswinkel.** Die generelle Idee dieser Variante besteht darin, dass mit Hilfe der im Smartphone integrierten Rotationssensoren (Accelerometer, Gyroscope) die Neigung des mobilen Geräts bezüglich einer im Vorfeld definierten Referenzlinie am gegenüberliegenden Flussufer und bezüglich des aktuellen Wasserstandes gemessen wird. Erfolgt die Messung stets von einer bestimmten vorgegebenen Messposition aus kann daraus mittels Methoden der Trigonometrie der aktuelle Wasserstand ermittelt werden. Voraussetzung für diesen Messvorgang ist, dass die Referenzlinie parallel zur horizontalen Wasserstandanschlagslinie liegt und mit dieser eine Ebene bildet (Wasserstandmessebene). Üblicherweise sind hierfür Kaimauern bzw. Flussbegrenzungsmauern oder Geländer geeignet. Die vorgegebene Messposition sollte parallel dazu auf der gegenüberliegenden Flussseite liegen. Mit Hilfe einer horizontalen Linie, die das Kamerabild des Smartphones überlagert, visiert der Nutzer dann durch Drehung des Smartphones zunächst die Referenzlinie an und bestätigt, sobald die angezeigte Referenzlinie mit der Abbildung der tatsächlichen Referenzlinie im Kamerabild übereinstimmt. Anschließend dreht der Nutzer das mobile Gerät und visiert die Wasserstandanschlagslinie an. Ist die Höhe der Referenzlinie bezogen auf den Pegelnullpunkt am Flussbett sowie die Distanz der Messposition orthogonal zur Referenzlinie bekannt, kann die absolute Höhe des Wasserstandes berechnet werden.

**Variante B – Referenz-Overlay.** Bei dieser Variante wird ebenfalls vorausgesetzt, dass die Messung von einer festgelegten Messposition aus erfolgt. Außerdem muss – analog zur Variante A – an der gegenüberliegenden Flussseite ein Referenzobjekt bzw. mindestens zwei Referenzpunkte mit bekannter Position bezüglich der Messposition vorhanden sein. Die Position (3D-Koordinaten) der Referenzpunkte werden dabei in Bezug auf die im Vorfeld festgelegte Messposition der Smartphone-Kamera (Kamera-Koordinatensystem) am vorgegebenen Messstandort definiert. Somit können diese Punkte lediglich mit Hilfe der Kamera-Projektionsmatrix (intrinsische Kamera-Parameter) auf das Kamerabild projiziert werden und dort angezeigt werden. Bei der Projektion wird also keine Rotation berücksichtigt bzw. eine Identitätsmatrix als fixe Orientierung definiert. Die Orientierungssensoren des Smartphones müssen bei dieser Variante daher nicht eingesetzt werden. Der Nutzer rotiert dann im ersten Schritt das

Smartphone solange bis die projizierten Referenzpunkte anvisiert sind und mit der Abbildung der tatsächlichen Referenzpunkte im Kamerabild übereinstimmen. Auf diese Weise wird die festgelegte Identitätsmatrix als fixe Rotationsmatrix forciert. Von dieser Kameralage aus nimmt der Nutzer anschließend ein Kamera-Standbild auf. Im zweiten Schritt zeichnet der Nutzer im aufgenommenen Standbild die Wasserstandschlaglinie ein. Dies geschieht beispielsweise durch Verschieben von zwei Punkten, durch welche die Wasserstandlinie definiert wird. Durch die Kenntnis der im Vorfeld definierten Aufnahmeposition bezüglich der Referenzpunkte und die Kenntnis der Höhe der Referenzpunkte bezogen auf den Pegelnullpunkt am Flussbett kann anschließend die Wasserstandlinie im 3D Raum und somit auch die absolute Höhe des Wasserstandes bezogen auf den Pegelnullpunkt bestimmt werden.

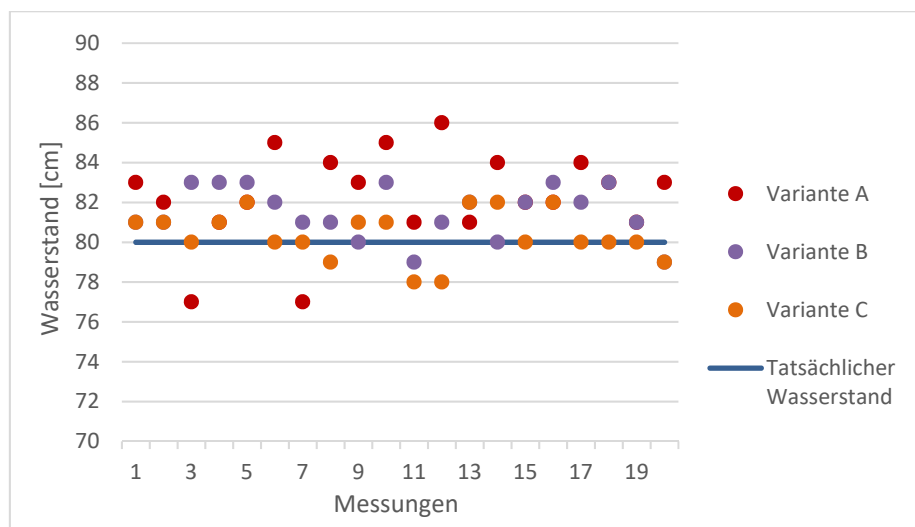
**Variante C – Korrespondenzpunkte.** Diese Messvariante basiert auf der generellen Idee, dass die Messposition durch den Nutzer bestimmt wird, indem dieser mindestens vier Punkte auf einem aufgenommenen Kamera-Standbild einzeichnet, welche mit vier bekannten Referenzpunkten (z.B. Eckpunkte eines Brückengeländers) korrespondieren. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Varianten wird also bei dieser Methode keine fixe Messposition vorausgesetzt. Der Nutzer kann von variabler Messposition aus ein Kamerabild aufnehmen, vorausgesetzt die definierten Referenzpunkte befinden sich im Sichtfeld der Kamera. Außerdem wird vorausgesetzt, dass die vier Referenzpunkte in einer Ebene liegen und, analog zu den übrigen Messvarianten, dass die 3D-Positionen der Referenzpunkte bezogen auf einen Pegelnullpunkt bekannt sind. Nach manueller Bestimmung der korrespondierenden Bildpunkte im aufgenommenen Kamerabild durch den Nutzer kann eine Homographie-Beziehung bestimmt werden zwischen der Kamerabild-Ebene und der Ebene auf der gegenüberliegenden Flussseite, in der die Referenzpunkte liegen. Aus dieser Homographie-Beziehung kann eine eindeutige Pose (Rotation, Translation) rekonstruiert werden, von welcher aus das Kamerabild aufgenommen wurde. Wird nun im zweiten Schritt durch den Nutzer zusätzlich die Wasserstandlinie im aufgenommenen Bild eingezeichnet, kann – analog zur Variante B - mit Hilfe der nun bekannten Messposition die Wasserstandlinie im 3D-Raum und somit die Höhe des Wasserstandes bestimmt werden.

#### 5.4 Evaluation

Die drei genannten Varianten zur Messung des Wasserstandes wurden prototypisch in einer Demo-Anwendung für die Plattform Android implementiert. Mit Hilfe dieser Prototyp-Anwendung konnte getestet werden, welche Messgenauigkeiten unter idealen Messbedingungen mit den Messmethoden jeweils erzielt werden können.

Zur Durchführung der Messungen wurden an einer senkrechten Wand Referenzlinien bzw. ein Referenzobjekt (Abmessungen: 150x55 cm) sowie ein fiktiver Wasserstand definiert, um einen idealen Messstandort an einem kleinen Gewässer zu simulieren. Der gedachte Wasserstand wurde auf einer Höhe von 80 cm über dem Boden (Pegelnullpunkt) festgelegt. Der Wasserstand wurde schließlich mit jeder der drei Messmethoden mit Hilfe eines LG Nexus 5X Smartphones als Testgerät gemessen. Für jede

Messmethode wurde die Messung 20 Mal wiederholt. Bei Variante A und Variante B, welche beide eine vorgegebene Messposition voraussetzen, wurden die Messungen in einem Abstand von 300 cm zum Referenzobjekt durchgeführt. Für Variante B wurde außerdem eine Messhöhe (Kamerahöhe) von etwa 150 cm festgelegt. Bei den Messungen mit Variante C variierte die Messposition mit einem Abstand von etwa 150 cm bis 600 cm und einem Betrachtungswinkel von bis zu  $\pm 45$  Grad zum Referenzobjekt. Die gemessenen Wasserstände sind in Abbildung 5 abgebildet. Tabelle 1 stellt zudem die durchschnittlich gemessene Wasserhöhe sowie die Standardabweichung je Messmethode dar.



**Abb. 5.** Messergebnisse der drei verschiedenen halbautomatischen Messmethoden

Es zeigt sich, dass unter den genannten Testbedingungen der Wasserstand mit allen Messvarianten recht genau bestimmt werden kann. Die Abweichungen betragen im Mittel lediglich etwa 2cm, was einer relativen Messungenauigkeit von etwa 2-3% entspricht. Es ist erkennbar, dass Variante A zwar ebenfalls noch recht genau ist, im Vergleich zu den übrigen Messverfahren aber die größten Messabweichungen erzeugt. Mit Variante C sind tendenziell die höchsten Genauigkeiten erzielbar. Die Standardabweichung der Messungen liegt hier nur bei etwa 1cm. Diese Variante erlaubt dabei auch die größte Flexibilität, da die Messposition variabel ist. Allerdings ist bei dieser Methode auch der Zeitaufwand für die Durchführung der Messung etwas höher, da zunächst alle vier Korrespondenzpunkte durch den Nutzer manuell festgelegt werden müssen. Varianten A und B können daher präferiert werden, wenn eine schnelle Messdurchführung wichtig ist.

Es ist abschließend anzumerken, dass die genannten Messergebnisse in einer idealen Messumgebung entstanden sind. Unter realen Bedingungen sind geeignete Referenzobjekte möglicherweise nur mit Einschränkungen verfügbar (z.B. Referenzobjekte sind

kleiner oder nicht ganz korrekt vermessen), so dass dort unter Umständen größere Messungenauigkeiten auftreten könnten.

**Tabelle 1.** Messergebnisse der drei verschiedenen halbautomatischen Messmethoden.

Variante	Variante A	Variante B	Variante C
<b>Durchschnittswert [cm]</b>	82,30 ± 2,32	81,50 ± 1,32	80,35 ± 1,23

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Methoden zur Messung des Wasserstandes unter Nutzung der in Smartphones integrierten Sensoren (Mobile Sensing) vorgestellt. Dabei wurde beschrieben, wie diese in ein Hochwasserprognosesystem zur Unterstützung des Hochwassermanagements in kleinen Einzugsgebieten auf Basis mobiler VGI-Daten eingebettet werden können. Der Einsatz derartiger mobiler Messverfahren zur Messung von Wasserständen oder zur Übermittlung von Schneehöhen und Niederschlagsintensitäten erhöht dabei die Dichte an verfügbaren hydrologischen und meteorologischen Informationen und kann somit die Hochwasserprognose verbessern.

Es wurde gezeigt, dass mit Hilfe der Orientierungs- und Kamerasensoren von Smartphones geeignete bildbasierte Messmethoden entwickelt werden können, um den Wasserstand auf wenige Zentimeter genau zu ermitteln. Die präsentierten Ergebnisse der Evaluation zeigen, dass diese hohen Genauigkeiten zumindest unter idealen Messbedingungen möglich sind. Eine schwierige Aufgabe wird nun darin bestehen, ähnlich zufriedenstellende Ergebnisse unter realen Messbedingungen an tatsächlichen Messstandorten entlang von Gewässern zu erreichen. Unter realen Einsatzbedingungen müssen weitere wichtige Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Eine große Herausforderung wird dabei das Auffinden und Vermessen geeigneter Messstandorte sein, welche die notwendigen Rahmenbedingungen erfüllen (z.B. Vorhandensein geeigneter Referenzobjekte, zugängliche Messpositionen, definierbare Fließquerschnittsprofile etc.). Insbesondere die geeignete Markierung und Sichtbarmachung der Referenzpunkte und Messpositionen sowie die Usability und Nutzerfreundlichkeit der implementierten Messmethoden in der mobilen Anwendung wird eine entscheidende Rolle spielen für einen erfolgreichen Einsatz der Messmethoden in der Praxis. Nur wenn die exakte Vorgehensweise bei der Durchführung der Messungen mittels entsprechender Anleitungen allen Nutzergruppen klar und verständlich kommuniziert wird, können die Messungen problemlos durchgeführt werden.

In den nächsten Schritten sollen daher die entworfenen Messmethoden unter realen Bedingungen an ausgesuchten Messstandorten entlang kleiner Gewässer intensiv auf ihre Praxistauglichkeit hin geprüft werden. In einer anschließenden Pilotphase soll schließlich eine größere Anzahl an potenziellen Nutzern einbezogen werden, so dass die entworfene Hochwasserprognoseplattform und die generelle Praktikabilität und Effizienz des VGI-Ansatzes im Rahmen des Hochwassermanagements abschließend evaluiert und beurteilt werden kann.

## Literatur

1. Müller, U.: Hochwasserrisikomanagement - Theorie und Praxis. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2010).
2. Neumayer, E., Barthel, F.: Normalizing economic loss from natural disasters - A global analysis. *Global Environmental Change* 21, 13-24 (2011).
3. Kundzewicz, Z.W.: Floods - lessons about early warning systems. In: Late lessons from early warnings - science, precaution, innovation. European Environment Agency, EEA Report, No, 1/2013, pp. 347-368 (2013).
4. Blöschl, G.: Flood warning - on the value of local information. *Int. J. River Basin Management* 6(1), 41-50 (2008).
5. Fuchs-Kittowski, F.: Mobiles Crowdsourcing und Sensing. *WISU* 43(9), 1031-1038 (2014)
6. Goodchild, M. F.: Citizens as Voluntary Sensors - Spatial Data Infrastructure in the World of Web 2.0. *Int. J. Spatial Data Infrastructures Research* 2, 24-32 (2007).
7. Alcarria, R., Iturrioz, T.: Volunteered Geographic Information System Design - Project and Participation Guidelines. *Int. J. Geo-Inf.* 5(5) 108 (2016).
8. See, L. et al.: Crowdsourcing, Citizen Science or Volunteered Geographic Information - The Current State of Crowdsourced Geographic Information. *Int. J. Geo-Inf.* 5(5) 55 (2016).
9. Fuchs-Kittowski, F.; Bartusch, S.; Pfützner, B.; Fischer, F.: Mobile crowdsourcing of water level data. In: Wohlgemuth, V., Fuchs-Kittowski, F., Wittmann, J. (eds.): *Int. Conf. environmental information and communication technologies (EnviroInfo2016)*. pp. 233-240. Shaker, Aachen (2016).
10. Neubauer, G., Nowak, A., Jager, B., Kloyber, C., Flachberger, C., Foitik, G., Schimak, G.: Crowdtasking – A New Concept for Volunteer Management in Disaster Relief. In: Hřebíček, J., Schimak, G., Kubásek, M., Rizzoli, A, (eds.): *Environmental Software Systems - Fostering Information Sharing (ISESS2013)*, vol. 413, pp. 345–356. Springer, Berlin (2013).
11. Middelhoff, M., Widera, A., van den Berg, R., Hellingrath, B., Auferbauer, D., Pielorz, J., Havlik, D.: Crowdsourcing and Crowdtasking in Crisis Management - Lessons Learned From a Field Experiment Simulating a Flooding in City of the Hague. In: *International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management* (2016).
12. Sieber, R.: Public Participation Geographic Information Systems: A Literature Review and Framework. *Annals of the Association of American Geographers* 96, 491-507 (2006).
13. Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Ramanathan, N., Reddy, S., Srivastava, M. B.: Participatory sensing. *Workshop on World-Sensor-Web (WSW'06): Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications*, pp. 117-134 (2006).
14. Schimak, G., Havlik, H., Pielorz, J.: Crowdsourcing in Crisis and Disaster Management – Challenges and Considerations. In: Denzer, R., Argent, R.M., Schimak, G., Hřebíček, J. (eds.): *Int. Symp. Environmental Software Systems (ISESS 2015)*, vol. 448, pp. 56-70, Springer, Heidelberg (2015).
15. Abecker, A., Braun, S., Kazakos, W., Zacharias, V.: Participatory Sensing for Nature Conservation and Environment Protection. In: Arndt, H.-K., Knetsch, G., Pillmann, W. (eds.): *EnviroInfo 2012*, pp. 393-401. Shaker, Aachen (2012).
16. Kaewkitipong, L., Chen, C., Ractham, P.: Lessons Learned from the Use of Social Media in Combating a Crisis - A case Study of 2011 Thailand Flooding Disaster. *Int. Conf. on Information Systems (ICIS2012)*, pp. 1-17 (2012).
17. De Longueville, B., Annoni, A., Schade, S., Ostlaender, N., Whitmore, C.: Digital Earth's Nervous System for crisis events - real-time Sensor Web Enablement of Volunteered Geographic Information. *Int J. Digital Earth* 3(3), 242-259 (2010).

18. Poser, K., Dransch, D.: Volunteered geographic information for disaster management with application to rapid flood damage estimation. *Geomatica* 64, 89-98 (2010).
19. Goodchild, M.F., Glennon, J.A.: Crowdsourcing geographic information for disaster response - a research frontier. *Int. J. Digital Earth*, 3(3), 231-241 (2010).
20. Yates, D., Paquette, S.: Emergency knowledge management and social media technologies - A case study of the 2010 Haitian earthquake. *Int. J. Information Management* 31, 6-13 (2011).
21. Huang, C.-M., Chan, E., Hyder, A.: Web 2.0 and Internet Social Networking: A New tool for Disaster Management? - Lessons from Taiwan. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 10(1), 57 (2010).
22. Herschy, R. W.: *Streamflow Measurement*, CRC Press, Reading (UK), 3rd edition (2008).
23. Smith, L. C., Pavelsky, T. M.: Estimation of river discharge, propagation speed, and hydraulic geometry from space: Lena River, Siberia. *Water Resources Research* 44(3) (2008).
24. Iwahashi, M., Udomsiri, S., Imai, Y., Fukuma, S.: Water level detection for river surveillance utilizing JP2K wavelet transform. *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings (APCCAS 2006)*, 1741-1744 (2006).
25. Kim, Y., Park, H., Lee, C., Kim, D., Seo, M.: Development of a Cloud-based Image Water Level Gauge Development of River Eye system. *INPRA* 2, 22-29 (2014).
26. Lo, S.W., Wu, J. H., Lin, F.P., Hsu, C.H.: Visual sensing for urban flood monitoring. *Sensors* 15(8), 20006-20029 (2015).
27. Royem, A.A., Mui, C.K., Fuka, D.R., Walter, M.T.: Technical Note: Proposing a low-tech, affordable, accurate stream stage monitoring system. *Transactions of the ASABE* 55, 2237-2242 (2012).
28. Lowry, C.S., Fienen, M.N.: CrowdHydrology: Crowdsourcing hydrologic data and engaging citizen scientists. *GroundWater* 51, 151-156 (2013).
29. KISTERS: Einfach smart - App für Pegelmessung auf Knopfdruck (2016). [https://www.kisters.de/fileadmin/user\\_upload/Wasser/Produkte/WISKI/Produktblaetter/MobileWaterTracker\\_de\\_mail.pdf](https://www.kisters.de/fileadmin/user_upload/Wasser/Produkte/WISKI/Produktblaetter/MobileWaterTracker_de_mail.pdf)
30. Amin, D., Govilkar, S.: Comparative Study of Augmented Reality SDK'S. *Int. J. Computational Sciences & Applications (IJCSA)* 5(1), 11-26 (2015).
31. Fuchs-Kittowski, F., Simroth, S., Humberger, S., Fischer, F.: A content platform for smartphone-based mobile augmented reality. *Int. Conf. Informatics for Environmental Protection (EnviroInfo2012)* pp. 403-412. Shaker, Aachen (2012).
32. Lanfranchi, V., Wrigley, S., Ireson, N., Wehn, U., Ciravegna, F.: Citizens' Observatories for Situation Awareness in Flooding. *Int. Conf. Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2014)* pp.154-154 (2014).
33. WeSenseIt: Sensor Data - Sensors, Citizens, Information and Models (2016). <http://we-senseit.eu/wp-content/uploads/2014/12/data.pdf>
34. Fuchs-Kittowski, F., Faust, D.: Architecture of Mobile Crowdsourcing Systems. In: Baloian, N., Burstein, F., Ogata, H., Santoro, F., Zurita, G. (eds.): *Int. Conf. Collaboration and Technology (CRIWG2014) LNCS*, vol. 8658, pp. 121-136. Springer, Heidelberg (2014).
35. Kwonkyu, Y., Byungman, Y., Seokmin, L.: Surface Image Velocity Measurement System for Wide Rivers Using Smartphones. *IAHR World Congress, E-Proceedings*, pp. 1-3 (2015).
36. Garg, K., Nayar, S. K.: Vision and rain. *Int. J. Computer Vision* 75(1), 3-27 (2007).