Supplement of Geogr. Helv., 70, 333–348, 2015
http://www.geogr-helv.net/70/333/2015/
doi:10.5194/gh-70-333-2015-supplement
© Author(s) 2015. CC Attribution 3.0 License.

+ GEOGRAPHICA HELVETICA +

*Supplement of*

# Une représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité: cartographies des inondations lyonnaises

**F. Renard and D. Soto**

*Correspondence to:* F. Renard (florent.renard@univ-lyon3.fr)

**Please note that the Supplement is the German version of the article.**

The copyright of individual parts of the supplement might differ from the CC-BY 3.0 licence.

# Eine Risikodarstellung an der Schnittstelle von Naturgefahr und Verwundbarkeit: Kartografien der Lyoner Überschwemmungen

**Florent Renard, Didier Soto**

{Université Lyon 3 – UMR 5600 Umwelt Stadt Gesellschaft CNRS, Lyon, France}

Correspondence to: F. Renard (florent.renard@univ-lyon3.fr)

## Zusammenfassung

Die Vulnerabilitätsanalyse der Schadenpotenziale eines Gebiets ist ein wesentlicher Bestandteil einer Risikostudie, aber für eine konkrete Anwendung oft nicht geeignet. Sie gleicht häufig eher einer Erfassung aller ausgesetzten Elemente als einer tatsächlichen Abschätzung ihrer Verwundbarkeit gegenüber einer bestimmten Naturgefahr. Ihre Überschneidung mit den ausgewiesenen Naturgefahrenzonen bereitet auch zahlreiche methodologische, kartografische und praktische Probleme. Die vorliegende Arbeit befasst sich zunächst mittels einer Literaturstudie mit den wesentlichen Risikokonzepten. Anschließend wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, die es ermöglicht, genaue Kenntnisse über die Vulnerabilität eines Gebiets zu gewinnen, und die für alle Arten von Naturgefahren und Gebiete anwendbar ist. Um einen Gesamtüberblick des Risikos zu erhalten, wird die Vulnerabilität der Schadenpotenziale eines Gebiets den Naturgefahrenzonen mit Hilfe innovativer Verfahren der Geoinformatik und unter Berücksichtigung der Verteilung der beiden Komponenten räumlich gegenübergestellt. Im Rahmen dieser Studie wird diese Methodologie auf die Naturgefahren Überschwemmungen durch Hochwasser und abfließendes Niederschlagswasser in der Metropole Lyon angewendet.

## Abstract

Essential to risk studies, vulnerability analysis of the assets of an area is often not suitable for practical application. It is usually more an assets census than a real vulnerability assessment,

facing a given hazard. Its intersection with the hazards zoning poses also many methodological, cartographic and operational problems. This work starts with the key concepts of risk, thanks to a review of French and international literature study. Then, it provides a procedure which allows precise knowledge of the local vulnerability, available to all types of hazards and applicable to all areas. Finally, in order to get an overall perspective of risk, assets vulnerabilities are crossed with the hazards areas, in accordance to the spatial distribution of both components and using innovative geomatics operations. As part of this study, this methodology will be applied to the rivers flooding and overflowing runoff of the Greater Lyon.

## 1 Einleitung: Groß Lyon, ein Überschwemmungen ausgesetztes Gebiet

Die Communauté urbaine de Lyon (Groß Lyon) liegt im nördlichen Teil des Rhone-Korridors im Südosten Frankreichs und konzentriert 1,3 Millionen Einwohner auf einem Gebiet, in dem Überschwemmungen das am häufigsten auftretende und kostenmäßig höchste Risiko (Renard, 2010) darstellen, wie auch in der Mehrheit der restlichen Welt (UNISDR, 2011; Jongman et al., 2014). Seit Beginn des 21. Jahrhunderts ist die Überschwemmung die häufigste und mit einer Schadenshöhe von 16,2 Milliarden Dollar die kostenintensivste Naturgefahr. Hinsichtlich der Anzahl der Opfer (1054) liegt diese Naturkatastrophe an zweiter Stelle nach extremen Temperaturereignissen[1]. Sie kann durch Überflutungen der beiden wichtigsten Wasserläufe (Rhône und Saône) der Metropole Lyon entstehen; diese zeichnen sich durch einen langsamen Anstieg, aber hohe Abflussmengen aus. Sturzfluten durch Starkregen (flash floods - Gaume et al., 2009; Llasat et al., 2010; Marchi et al., 2010; Tarolli et al., 2012) sind im gesamten Lyoner Westen, der von zahlreichen Bachläufen - Zuflüssen des Rhônes - durchzogen ist und starke Gefälle aufweist (Abb. 1) ebenfalls möglich. Überschwemmungen durch abfließendes Niederschlagswasser im Stadtbereich stellen nicht nur im Zentrum von Groß Lyon ein besonderes Problem dar, sondern auch im Lyoner Osten, in der Ebene, die kein natürliches Gewässersystem aufweist und stark wasserundurchlässig ist. Schließlich sind Überschwemmungen auch im städtischen Zentrum nach starken Regenfällen infolge eines Anstiegs des Grundwasserspiegels möglich. Das gesamte Groß Lyon kann somit von der Überflutung seiner Schadenpotenziale betroffen sein.

[1] Quelle: www. emdat.be

Zu den im Lyoner Gebiet auftretenden Naturgefahren (physikalische Ereignisse bestimmter Art, Intensität und Häufigkeit) und den damit verbundenen Risiken wurden zahlreiche spezifische Studien (Kouyi et al., 2011; Becouze-Lareure, 2012; Lepioufle et al., 2012; Braud et al., 2013) erstellt. Zur Vulnerabilität des Gebiets Groß Lyon gibt es jedoch nur wenige Studien, und diese sind alle anfechtbar und verbesserbar (insbesondere Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2005; Rufat, 2007; Renard et Chapon, 2010, auf diesem Gebiet). Das traditionell auf die Kontrolle und Einschränkung der Naturgefahren basierende Risikomanagement hat sich erst später einem Versuch der Verringerung der Vulnerabilität der Schadenpotenziale eines Gebiets zugewandt. Zudem hat die gleichzeitige Berücksichtigung der Exposition gegenüber Naturgefahren und der Vulnerabilität eines Gebietes keine überzeugenden Ergebnisse geliefert (wie zum Beispiel in Granger, 2009; Caradot et al., 2011); die hier vorliegenden Lücken werden im dritten Teil des Artikels erläutert). Diese Studie schlägt somit eine Methodologie zur Kartografierung der Überschwemmungsrisiken vor, die auf die Exposition der Vulnerabilität der Schadenpotenziale gegenüber den betrachteten Naturgefahren ausgerichtet ist. Diese Methodologie wird auf das Gebiet Groß Lyon angewendet, ist aber auf jegliches andere Gebiet übertragbar. Die verwendeten Bezeichnungen werden im ersten Teil dieses Artikels ausführlich behandelt.

## 2 Grundlegendes zu den Risikokomponenten

### 2.1 Das Risiko: ein mehrdeutiger Begriff

Der von verschiedenen Fachrichtungen verwendete mehrdeutige Risikobegriff hat zahlreiche Definitionen (Füssel and Klein, 2006; O'Brien et al., 2007). »Von Geografen und anderen Fachrichtungen wurden seit Jahren viele Definitionen vorgeschlagen, die lückenhaft, redundant und verwirrend sind oder gar Widersprüche zwischen den verschiedenen Fachrichtungen aufweisen« (Moser, 2010). »Je nach berücksichtigtem Ansatz unterscheidet sich die Definition stark, wobei mal die funktionellen und technischen Gesichtspunkte, mal die soziale und psychologische Dimension hervorgehoben werden« (Thomi, 2010). In den meisten Fällen wird das Risiko als das Produkt der Interaktionen zwischen einer Gesellschaft und ihrer Umwelt in einem bestimmten Raum begriffen (zum Beispiel nach Kron, 2002; UNISDR, 2011; IPCC, 2012; Poussin et al., 2012). Es ist »unzertrennlich mit den territorialen

Strukturen verbunden« (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010) und »tief im Gebiet verwurzelt« (November, 2002). Es handelt sich um einen »heterogenen Begriff, [...] der als die mögliche Konkretisierung von mehr oder weniger voraussehbaren Ereignissen betrachtet wird und der zumeist räumlich und zeitlich negative Auswirkungen hat« (Demoraes et D'Ercole, 2009). Es ist somit das »Ergebnis des Zusammentreffens eines störenden Elementes zufallsbedingter Art und eines verwundbaren Elementes« (Chocat, 1997), »die Wahrscheinlichkeit des Verlusts von Gegenständen (das Schadenpotenzial), die einem Schaden erzeugenden Ereignis (die Naturgefahr) ausgesetzt sind« (Veyret et Reghezza, 2006), oder auch »etwas potentiell Mögliches, das noch nicht eingetreten ist, aber von dem man ahnt, dass es sich für die Individuen oder eine Gemeinschaft in einem bestimmten Raum oder in bestimmten Räumen in ein verhängnisvolles Ereignis verwandeln wird« (November, 2002). Somit »beruht das herkömmliche Verständnis des Naturrisikos auf der Unterscheidung zwischen zwei Risikokomponenten: der Naturgefahr, also dem physikalischen Vorgang als Gefahrenquelle, und der Verwundbarkeit, die auf die Neigung des Schadenpotenzials, eine Beschädigung zu erleiden, verweist« (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010). Für Bourrelier (2006) gilt: »das Zusammenspiel von Naturgefahr und Verwundbarkeit ist der Schlüssel zum Management von Risiken aller Art«. »Es ist fortan anerkannt, dass das Risiko aus der Verbindung einer Bedrohung (die Naturgefahr) und mehr oder weniger verwundbaren Schadenpotenzialen entsteht« (Léone, 2007), je nach ihrer tatsächlichen Exposition, das heißt »Art und Ausmaß, in dem ein System einer Naturgefahr ausgesetzt ist« (Füssel and Klein, 2006), oder auch der Kombination der Naturgefahrenhäufigkeit und den ausgesetzten Bevölkerungen (Peduzzi et al., 2009).

## 2.2 Die Naturgefahr2: lange Zeit der einzige berücksichtigte Faktor

»Die lange Zeit naturalistische Geografie Frankreichs widmete sich zunächst der Analyse der Naturgefahr, bevor sie sich in den Sozialwissenschaften verankerte« (Veyret et Reghezza, 2006). So fokalisierte sich das Risikomanagement lange Zeit auf die Beherrschung der Naturgefahr. Seit einigen Jahrzehnten hat die Kenntnis der Naturgefahr »beachtliche Fortschritte [gemacht]: Die Ereignisse wurden identifiziert, vermessen, Modelle wurden erstellt, sie wurden historisch eingeordnet, aktualisiert, kartografiert« (Bourrelier, 2006). »Bis zum Ende der achtziger Jahre enthielten die sogenannten Naturrisikokarten in den meisten

[2] (Anmerkung der Übersetzerin: die wörtliche Übersetzung des im Französischen verwendeten Begriffs *aléa* lautet: die Unwägbarkeit, die unliebsame Zufälligkeit)

Fällen nur einen topografischen Hintergrund, auf dem sich die einem bestimmten Ereignis (Überschwemmung, Erdrutsch, Lawine, usw.) ausgesetzten Gebiete überlagerten« (Demoraes et D'Ercole, 2009), d.h. es handelte sich um eine Einteilung in Naturgefahrenzonen.

Allgemeinsprachlich »drückt [der im Französischen verwendete Begriff] *aléa* das Maß der Wahrscheinlichkeit einer Situation, eines Ereignisses oder irgendeiner Ursache aus. Im Bereich der Naturrisiken suggeriert der Begriff die Vorstellung von Gefahr und nimmt eine aktive Rolle ein, die sich in ihren räumlich-zeitlichen Eigenschaften und ihrer Intensität materialisiert« (Haziza, 2007). Er wird somit als ein bedrohliches Ereignis wahrgenommen, das Schaden verursachen kann, und sowohl durch eine Intensität in einer bestimmten Zeitspanne und in einem bestimmten Raum charakterisiert wird, als auch durch seine Eintrittswahrscheinlichkeit. Griot et Ayral (2001) sehen die Naturgefahr als ein »möglicherweise eintretendes Ereignis, das aus Faktoren oder Vorgängen resultiert, die sich zumindest teilweise den Menschen entziehen«. Für Propeck-Zimmermann et al. (2009) »versteht man die Naturgefahr als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis eintritt, welches in einem bestimmten Raum schädigende Effekte zur Folge haben kann«. »Die aktuelle Entwicklung der Vorgehensweisen und der gesetzlichen Regelungen führt [indessen] dazu, dass die Vulnerabilität der ausgesetzten Milieus gegenüber einer Störung eine immer größere Bedeutung gewinnt« (Chocat, 1997). Darüber hinaus wäre nach (Gilbert, 2006) die Naturgefahr nur der Anlass, dass die Verwundbarkeiten zum Ausdruck kommen.

## 2.3 Die Vulnerabilität: eine neuere und notwendige Einsicht

Im Gegensatz zur Naturgefahr hält der Ausdruck Verwundbarkeit oder Vulnerabilität erst spät in die Studien Einzug (Ruin and Lutoff, 2004; Veyret and Laganier, 2013; Koks et al., 2015). Er tritt an die Stelle von »so unterschiedlichen Bezeichnungen wie Sensibilität, Empfindlichkeit, Anfälligkeit« (Veyret et Reghezza, 2006). Haziza (2007) betrachtet die Vulnerabilität als die »Antwort eines Gebiets auf die Naturgefahr«. Sie wird von Griot et Ayral (2001) als »ein Anzeichen der Anfälligkeit der Risikoelemente gegenüber dem Eintritt eines Ereignisses« wahrgenommen, sowie von Veyret et Reghezza (2006) als »Grad der Beschädigung infolge der Aussetzung der Elemente«. Für Blaikie et al. (1994) ist die Vulnerabilität der Grad des Verlusts an Gütern, auf die eine Naturgefahr einer bestimmten Stärke einwirken könnte. Diese Definitionen stimmen mit denen des Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC, 2012) überein. Für d'Ercole et Pigeon (1999) ist sie »die Neigung einer bestimmten Gesellschaft, im Falle des Auftretens eines natürlichen oder

anthropogenen Phänomens Schäden zu erleiden«. Diese Definition liegt der von Propeck-Zimmermann et al. (2009) sehr nah, wonach »die Vulnerabilität die Neigung der ausgesetzten Elemente, Schäden zu erleiden, ausdrückt«. In der vorliegenden Studie entspricht die Vulnerabilität dem Vorschlag von Gleyze et Reghezza (2007), als »die Neigung der menschlichen, materiellen, ökologischen ... Güter, einen Schaden zu erleiden«. Jegliches Schadenpotenzial, auf dessen Unversehrtheit das Auftreten einer Naturgefahr eine Auswirkung haben könnte, gilt somit als verwundbar.

Durch die Beziehung zwischen einer Naturgefahr und der Vulnerabilität der Schadenpotenziale entsteht somit der Risikobegriff. Die bestehende Beziehung zwischen diesen zwei Bezeichnungen ist jedoch nicht ganz eindeutig. »Die Vulnerabilität ist völlig unabhängig von der Naturgefahr« nach Chocat (1997), aber sie tritt während des Auftretens der Letzteren in Erscheinung. Diese Sichtweise wird von den meisten Autoren geteilt, insbesondere von Veyret et Reghezza (2006): »Die Vulnerabilität ist […] eine echte Eigenschaft einer Gesellschaft, einer sozialen Gruppe, eines Individuums, ein interner Risikofaktor, so gut wie unabhängig von der Naturgefahr, insofern als sie schon vor der Letzteren vorhanden ist, aber jedoch von ihr ans Licht gebracht wird«.

Aus den zahlreichen in der Literatur vorkommenden, jedem Autor eigenen Definitionen geht der vielstimmige Charakter des Vulnerabilitätskonzepts hervor (Shi and Zeng, 2013; Lummen and Yamada, 2014; Marzo et al., 2015). »Die Beschreibung der Vulnerabilität zeigt sich [somit] sehr oft als ein extrem schwieriges Unterfangen« (Haziza, 2007). Für ein effizientes Risikomanagement in einem Gebiet müssen die unterschiedlichen, aufeinandertreffenden Parameter der Naturgefahren, aber auch der Vulnerabilitäten in ihrer Gesamtheit beurteilt werden (Reghezza, 2009).

## 2.4 Die verwundbaren Schadenpotenziale eines Gebietes

In der Literatur zum Risikobegriff ist »Schadenpotenzial« ein sehr häufig verwendeter Ausdruck, der nunmehr fast untrennbar mit dem Begriff der Vulnerabilität verbunden ist. Die Schadenpotenziale stellen die Gesamtheit der von einer Naturgefahr direkt bedrohten Personen und Sachwerte, die möglicherweise Beeinträchtigungen oder Schäden erleiden können, dar (Griot et Ayral, 2001). »Unter Schadenpotenzial versteht man Alles, was Schäden oder Störungen erleiden kann, und was sich auf die Bestandteile und die gesamte Funktion des Gebiets (Bevölkerung, Bausubstanz, natürliche Umgebung, Transport ...) bezieht« Propeck-Zimmermann et al. (2009). Schließlich sind die Schadenpotenziale für Demoraes et

D'Ercole, (2009) »per Definition, die zur Funktion und Entwicklung eines Gebiets grundlegend notwendigen Elemente. Ihre Beschädigung, ihr Ausfall oder Verlust wären folglich ganz besonders nachteilig für das jeweilige Gebiet«. Unterschiedliche Naturgefahren können auf diese Schadenpotenziale einwirken, und die Abschätzung ihrer Vulnerabilität ist das Ziel des folgenden Teils dieser Arbeit.

# 3 Eine hierarchische multikriterielle Methode der Entscheidungshilfe zur Vulnerabilitätsanalyse eines Gebiets

## 3.1 Die unterschiedlichen städtischen Vulnerabilitätsabschätzungen und ihre Grenzen

In Frankreich beruht das Naturrisikomanagement hauptsächlich auf der städtebaulichen Risikovorbeugung und den gesetzlichen Vorschriften. Das Instrument hierzu ist der mit dem Gesetz vom 2. Februar 1995 eingeführte Präventionsplan für Naturrisiken (*Plan de prévention des risques naturel*s, *PPRN*), der für eine Gemeinde oder ein Risikoeinzugsgebiet erstellt und vom Staat ausgearbeitet wird: Er weist die Risikozonen aus und reglementiert die örtliche Bebauung. Er reglementiert die Bodennutzung abhängig von den vorhandenen Naturrisiken; nach öffentlicher Umfrage und Konsultation der Gemeinden wird er vom Präfekten genehmigt und dem örtlichen Städtebauplan (*Plan local d'urbanisme, PLU*) beigefügt. Das endgültige Dokument enthält einen Bericht über die Naturgefahren mit detaillierten Karten sowie deren Auswirkungen auf Personen und Sachgüter. Nach dem Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) [3] besteht eine Verwandtschaft zwischen dem französischen PPRN in seinem Teil über die Naturgefahren und der Schweizer Gefahrenkarte, die Informationen über die unterschiedlichen Arten von Gefahren und deren Ausmaße enthält; die unterschiedlichen Gefahrenstufen und die betroffenen Gebiete werden farblich (rot, blau, gelb, gelb schraffiert und weiß) in den Maßstäben 1:2000 bis 1:10000 dargestellt. In den französischen und Schweizer Vorschriften liegen jedoch keine wirklich einsatzfähigen Vulnerabilitätsstudien vor. Verschiedene Autoren haben Vorschläge zur Abschätzung der Vulnerabilität - insbesondere für Lyon - entwickelt, wobei die Methoden, Ziele und die Anwendbarkeit variieren. Die meisten dieser Studien beschränken sich gewöhnlich auf die Berücksichtigung

[3] http://www.bafu.admin.ch/

der Siedlungsdichte und vollständigere Studien sind selten (Fedeski and Gwilliam, 2007; Kaźmierczak and Cavan, 2011; Fuchs et al., 2012; Kappes et al., 2012). »Die Analyse von rund zwanzig Vulnerabilitätsstudien zeigt, dass diese oft nicht alle verwundbaren Elemente berücksichtigen« Griot (2007). Das Gleiche wird hier für alle, ob auf lokaler oder internationaler Ebene, untersuchten Gebiete festgestellt. Im Allgemeinen werden die materiellen und die ökologischen Schadenpotenziale von den Abschätzungen ausgeschlossen; diese beschränken sich oft auf eine Analyse der Einwohnerzahl pro Gemeinde oder in einigen wenigen Fällen auf kleinere administrative Einheiten. Die praktische Anwendbarkeit dieser Studien ist infolge ungeeigneter Maßstäbe, der Art der berücksichtigten Schadenpotenziale und der angewandten Methode oft begrenzt. Die vorliegende Studie stützt sich auf das Gebiet Groß Lyon und zielt in einer umfassenderen Vorgehensweise darauf, alle vorliegenden Schadenpotenziale zu berücksichtigen. Zwar wurden zahlreiche Arbeiten zu den Naturgefahren dieses Risikogebiets durchgeführt, doch gibt es zu seiner Vulnerabilität nur einige wenige Studien, die methodologische Schwächen aufweisen (insbesondere Combe, 2007; Rufat, 2007; Renard et Chapon, 2010). Es ist anzumerken, dass sich das Risikomanagement lange Zeit auf die Beherrschung der Naturgefahr konzentrierte, unabhängig von Anwendungsort und -art (Veyret et Reghezza, 2006), und dass es nicht charakteristisch für den untersuchten Ort oder für die jeweils verantwortlichen Personen ist.

Diese Vulnerabilitätsabschätzung für das Gebiet Groß Lyon soll objektiv sein, und die Schlussfolgerungen sollen von möglichst vielen Personen geteilt werden, um einen Konsens für die praktische Anwendung zu finden. Hierzu werden hierarchische multikriterielle Methoden der Entscheidungshilfe sowie Expertenbeurteilungen eingesetzt.

## 3.2 Auswahl einer Methode der Entscheidungshilfe für die Vulnerabilitätsabschätzung der Schadenpotenziale eines Gebiets

Die Methoden zur Entscheidungshilfe werden eingesetzt, um die Auswahl von unterschiedlichen Entscheidungs- oder Bewertungsalternativen in komplexen Situationen, bei denen mehrere qualitative und quantitative Kriterien eine Rolle spielen, zu erleichtern. Diese Methoden ermöglichen die Integration verschiedener Kriterien mit dem Ziel, eine oder mehrere Aktionen, Optionen oder Lösungen auszuwählen. Ziel ist hier, die ausgesetzten Elemente abhängig von ihrer Vulnerabilität gegenüber der Naturgefahr zu priorisieren. Ihre Gewichtung muss mit Hilfe eines Einstufungsverfahrens erfolgen. Es gibt verschiedene Methoden der Entscheidungshilfe mit ihren jeweils eigenen Vorteilen und Nachteilen (Tabelle

1). Ausschlaggebend für die Auswahl der Methode waren die wichtigsten Parameter, wie die Ziele, die Einfachheit der Anwendung, die Feinheit der Bewertung, die Flexibilität, die erforderliche Zeit für ihre Umsetzung und das Erfahrungs-Feedback. Nach einer Bewertung der unterschiedlichen Techniken (in Renard, 2010) fiel unsere Wahl auf den paarweisen Vergleich, genauer auf den *Analytic Hierarchy Process* (AHP – Saaty, 1980). Hiermit ist es möglich, Alternativen entweder auf der Basis eines einzigen Kriteriums oder mehrerer unterschiedlicher Kriterien zu ordnen.

Der AHP ist eine Theorie der Messung von Kriterien einer bestimmten Situation. Sie basiert auf der Ableitung von relativen Wichtigkeitsprioritäten durch den paarweisen Vergleich homogener Alternativen, die ein gemeinsames Attribut teilen (Saaty, 1994; Kendrick et Saaty, 2007). Diese Methode geht sowohl systembezogen (Fokus auf die Funktion des Gesamtsystems) als auch deduktiv vor (Beziehung der Teile zueinander), um eine komplexe Situation in verschiedene interagierende Elemente zu strukturieren. Ziel ist deren quantitative Erfassung und die Zuordnung von Werten, die ihren Auswirkungen auf das Gesamtsystem entsprechen (Griot, 2003). Die zahlenmäßige Bestimmung der Werte der verschiedenen Elemente beruht auf der Erfahrung und der Beurteilung durch Fachleute; Ziel ist der Erhalt von Gewichtungen der verschiedenen Komponenten, d.h. im vorliegenden Fall die Vulnerabilitätsfunktionen.

Diese Methode der hierarchischen multikriteriellen Analyse besteht aus fünf Hauptphasen, die im folgenden Teil durchgeführt und durch eine Kartografie des Risikos (Abb. 2) vervollständigt werden:

- Ausführliche Beschreibung des Systems und des Schadenpotenzials, um die komplexe Situation zu charakterisieren, zusammenzufassen und in ihre Bestandteile zu zerlegen.
- Aufbau der Hierarchien zur Organisation der Schadenpotenziale, um eine strukturierte und möglichst vollständige Lösung des Problems zu erhalten.
- Teilweise gelenkte Gespräche, bei denen die betroffenen Fachleute durch binären Vergleich die ausgesetzten Elemente bestimmen, die eine höherer Vulnerabilität gegenüber der Überflutung aufzuweisen scheinen als die anderen.
- Bestätigung der Konsistenz der Antworten der Fachleute und Gewichtungsberechnung der Schadenpotenziale.
- Zusammenfassung der Antworten zum Erhalt der Vulnerabilitätsfunktionen.

# 4 Geoinformatische Anwendung der Risikodarstellung auf Groß Lyon

## 4.1 Strukturierte hierarchische Gliederung des Systems

Zur umfassenden Beschreibung der gesamten Situation nimmt man eine hierarchische Aufgliederung der Bestandteile vor (Tixier et al., 2006). Es wird somit eine für das Gebiet spezifische Hierarchie erstellt, die auf einer Einordnung basiert, bei der die drei hauptsächlichen Schadenpotenziale (Menschen, Umwelt, materielle Güter) mit ihren Vulnerabilitätsfaktoren kombiniert werden (Abb.3).

Die menschlichen, materiellen und ökologischen Schadenpotenziale kann man, wie in Abb. 3 dargestellt, in jeweils sechs Hauptgruppen unterteilen. Diesen können gegebenenfalls Anfälligkeitsfaktoren zugeordnet werden (in Abb. 3 angegeben). Die von Léone (2007), Propeck-Zimmermann et al.(2009) oder Veyret et Laganier (2013) vorgeschlagenen Anfälligkeitsfaktoren sind inhärente Eigenschaften des jeweiligen Schadenpotenzials, die dessen Vulnerabilität betreffen. Beim materiellen Schadenpotenzial »beeinflusst die Bauart die Vulnerabilität des Wohngebäudes« (Combe, 2007), und beim ökologischen Schadenpotenzial können die Anfälligkeitsfaktoren den Zustand der Felder sowie die Art und den Wachstumsstand der Kulturen berücksichtigen. Die dem menschlichen Schadenpotenzial zugeordneten Anfälligkeitsfaktoren ermöglichen über die einfache Berücksichtigung der Wohnbevölkerungsdichte hinauszugehen. Diese Dichte wird oft als der offensichtlichste Faktor der Vulnerabilität betrachtet (Blancher et al., 1996). Sie ist jedoch auch eine Abbildung der Ressourcenkonzentration, die in Notsituationen eine schnelle und effiziente Reaktion ermöglicht, obwohl nach Angaben der Ordnungskräfte und der Feuerwehr (*Service Départemental d'Incendie et de Secours du Rhône*) alle Gemeinden der Metropole Lyon in weniger als 10 Minuten erreichbar sind (Rufat, 2007). Aufgrund dieser anfechtbaren Tatsachen muss die Analyse der Wohnbevölkerung wie auch der anderen Bevölkerungsgruppen durch Anfälligkeitsfaktoren verfeinert werden. Denn die Konsequenzen der Katastrophen sind bei einem vergleichbaren Naturereignis je nach Bevölkerungsgruppe unterschiedlich. Nach Dauphiné et Provitolo (2013) sind Personen der Altersgruppen unter 10 und über 75 Jahren die anfälligsten und im Notfall am schwierigsten zu evakuierenden Personen. Das gleiche gilt für Menschen mit eingeschränkter Mobilität. Ebenso sind die Bewohner behelfsmäßiger Unterkünfte anfälliger und allen Arten von Naturgefahren leichter ausgesetzt (Rufat, 2007). Auch das Bildungsniveau wurde als Indikator für die Fähigkeit eingesetzt, im Fall von Katastrophen Lösungen zu finden: Diese Fähigkeit verhält sich

proportional zum Bildungsgrad (Kreimer et al., 2003; Veyret and Laganier, 2013), so dass wir folglich die Bevölkerung über 15 Jahre ohne Schul- oder Berufsabschluss berücksichtigen mussten.

Der Aufbau dieser hierarchischen Struktur stützte sich für das menschliche Schadenpotenzial auf die Bevölkerungszählung des französischen Nationalen Instituts für Statistik und Wirtschaft (*Institut National de la Statistiques et des Etudes Economiques, INSEE*) von 2012 auf Ebene der Gebietseinheiten *IRIS*[4]. Die Daten zum ökologischen und zum materiellen Schadenpotenzial stammen aus der Datenbank des Geographischen Informationssystems GIS (*système d'information géographique, SIG*) der Metropole Lyon, aus der Datenbank Georhonealpes (zuvor Prodige) des regionalen Amts für Umwelt, Raumplanung und Wohnen (*Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL)* und dem Managementplan für das Gewässereinzugsgebiet des Lyoner Ostens (*SAGE*). Die Anfälligkeitsfaktoren für das materielle und das ökologische Schadenpotenzial konnten allerdings infolge Zeitmangels noch nicht berücksichtigt werden.

Die hierarchische Aufgliederung der Lyoner Schadenpotenziale erfolgte in Zusammenarbeit mit den lokalen Akteuren von Groß Lyon. Sie ist jedoch keinesfalls definitiv, und die Schadenpotenziale sowie die Anfälligkeitsfaktoren können abhängig von der praktischen Anwendung und neu hinzugewonnenen Kenntnissen angereichert werden. Vorteil dieser Methode ist ihre Fähigkeit zur kontinuierlichen Verbesserung, wodurch ihre Anwendung durch die lokalen Akteure favorisiert wird.

## 4.2 Hinzuziehen von Fachurteilen zur Berechnung der Prioritäten

Die Abschätzung der Vulnerabilität der ausgesetzten Elemente beruht auf dem Urteil von rund 40 lokalen Fachleuten (Ingenieure der Gebietskörperschaften, Ingenieurbüros und Universitäten), das mit Hilfe einer Matrizenrechnung abgeleitet wird. Die Fachleute sind zur Hälfte Angestellte der Gebietskörperschaften (Ingenieure und Techniker im öffentlichen Dienst), zu 30 % Angestellte von Ingenieurbüros (Véolia, Lyonnaise des eaux, Egis, usw. ...) und zu 20% Universitätsmitarbeiter; sie wurden infolge ihrer beruflichen Tätigkeit in der

[4] Unter *IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique)* versteht man die Unterteilung des Gebiets in homogene, zeitlich stabile Einheiten, die den Grundbaustein für die Verbreitung von kommunalen Daten bilden. Ihre Einwohnerzahl liegt im Allgemeinen zwischen 1800 und 5000. Innerhalb der durch die großen Einschnitte im städtischen Gefüge (Hauptstraßen, Bahntrassen, Wasserläufe, usw. ...) abgegrenzten Einheit herrscht eine homogene Wohnart vor.

Raumplanung, der Stadtplanung, des Risikomanagements und der Risikoprävention ausgewählt. Diese Fachleute bestätigten auch die zuvor erstellte hierarchische Aufgliederung.

Die Quantifizierung beruht auf dem paarweisen Vergleich der Schadenpotenziale mit Hilfe einer spezifischen Skala, die auf den Kriterien von Saaty (1980 – Tabelle 2) basiert. Dieses Bewertungsraster hat den Vorteil, sowohl subjektive als auch strikt quantitative Urteile zu erfassen, um den Prioritätsgrad eines Schadenpotenzials gegenüber einem anderen festzustellen. So wird jedes einzelne Schadenpotenzial mit allen anderen der gleichen Ebene verglichen (und relativ mit jedem der Schadenpotenziale der darüberliegenden Stufe). Die Fachleute müssen somit die Vulnerabilität von Schadenpotenzialen gleicher Art, die sich auf der gleichen Ebene der hierarchischen Aufgliederung befinden, für eine Wasserhöhe von 50 cm beurteilen. Diese Höhe wurde in Abstimmung mit den Mitarbeitern der Gebietskörperschaften der Metropole gewählt, da sie dem lokalen Kontext entspricht (Lyon liegt nicht am Mittelmeer oder in den Cevennen, wo oft wesentlich stärkere Überschwemmungen auftreten) und es sich um eine mittlere minimale kritische Höhe handelt, die Auswirkungen auf die häuslichen Stromnetze hat. Andere Variablen wie die Wasserverschmutzung, die Geschwindigkeit oder die Dauer der Überschwemmung können auch einen Einfluss auf das Ausmaß der Auswirkungen haben, aber sie sind relativ schwer messbar (Caradot et al., 2011). Zudem stehen sie oft stark in Korrelation mit der Überschwemmungshöhe, so dass sie entweder nicht oder nur als sekundäre Parameter berücksichtigt werden (Caradot et al., 2011; Messner et Meyer, 2006; Penning-Rowsell et al., 2005).

Die Vergleichsmatrizen werden mit Hilfe der Beurteilungen der Fachleute ausgefüllt und ermöglichen die Berechnung der Vulnerabilität eines jeden Schadenpotenzials. Darüber hinaus wird ein Ratio berechnet, um die Konsistenz der gelieferten Antworten zu bestätigen. Ein Beispiel zur Erläuterung: Wenn einer der Fachleute das Schadenpotenzial A höher als das Schadenpotenzial B gewichtet, und das Schadenpotenzial B höher als das Schadenpotenzial C, dann müsste er logischerweise das Schadenpotenzial A höher als das Schadenpotenzial C gewichten (Transitivität der Beurteilungen). Die Konsistenz der Antworten wird mit Hilfe eines Ratios geschätzt, der aus dem Eigenwert der Vergleichsmatrizen hervorgeht und kleiner als 10 % sein muss. Im gegenteiligen Fall werden die inkonsistenten Antworten eliminiert. Anschließend werden die Antworten durch einen geometrischen Mittelwert entsprechend der Empfehlungen des Verfassers dieses Artikels zusammengefasst, um eine einzige

Vergleichsmatrix zu erhalten (Tixier et al., 2006). Zum Abschluss wurden die Eigenvektoren der quadratischen Beurteilungsmatrizen berechnet, um die Funktionen zur Bestimmung der Gewichtungen zu erhalten.

### 4.3 Überlegungen zum Analyserahmen: Schadenpotenziale unterschiedlicher Größe und Form

Ziel des AHP ist hier, die Gewichtungen der Vulnerabilität der auf dem Gebiet von Groß Lyon vorliegenden Schadenpotenziale (Abb.3) zu erstellen. Zunächst werden die Prioritäten mit Hilfe der Vulnerabilitätsfunktionen (Gleichung, die pro Ebene den Anteil eines jeden Schadenpotenzials abhängig von seiner Vulnerabilität liefert) ermittelt; zur praktischen Anwendung müssen diese dann durch kartografische Arbeit visuell deutlich gemacht werden. Die heterogenen Informationen zu den Schadenpotenzialen werden deshalb mit Hilfe eines GIS räumlich dargestellt, behandelt, gespeichert und analysiert. Das GIS kartografiert die Vulnerabilität der Schadenpotenziale entsprechend der verschiedenen Vulnerabilitätsfunktionen; es ermöglicht eine quantitative Abfrage, d.h. abhängig von der Menge der in der Zelle vorhandenen Schadenpotenziale, oder eine qualitative Abfrage, d.h. abhängig von der Vulnerabilität des Schadenpotenzials gegenüber der Naturgefahr.

Die grafische Darstellung der Schadenpotenziale liegt jedoch in unterschiedlichen räumlichen Formen, d.h. als Fläche, Linie oder Punkt vor. Es stellt sich nun die Frage nach den untersuchten Sektoren der Schadenpotenziale, die standardisiert werden müssen, damit man sie untereinander kombinieren kann. Bei vorhergehenden Studien beruhten diese Sektoren auf den Gemeindegrenzen, den IRIS oder auf »Bereichen mit homogener oder dominanter Besiedlung« (Combe, 2007). Aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe konnten keine quantitativen Vergleiche zwischen den Sektoren durchgeführt werden; relative Vergleiche waren möglich, indem man die Flächen der in jedem Sektor vorliegenden Schadenpotenziale durch die des gesamten Gebiets dividiert. Nicht nur die sehr heterogenen Flächeninhalte sondern auch die unterschiedlichen Formen der Gemeinden oder der festgelegten Einheiten *(IRIS)* verhinderten den Vergleich der Sektoren und beeinträchtigten die Interpretation der Ergebnisse. Wir entschieden uns für eine Standardisierung von Größe und Form der untersuchten Sektoren, um mit Rohdaten (und nicht relativen, vom Flächeninhalt abhängigen Daten) arbeiten zu können und den Vergleich der Sektoren und das Verständnis der Ergebnisse zu erleichtern. Die Grenzen der Gemeinden oder der Einheiten *(IRIS)* des Statistikinstituts *(INSEE)* werden nicht mehr berücksichtigt. Das Untersuchungsgebiet wird in

Zellen gleicher Form und Größe zerlegt. Üblicherweise werden zwei Arten von Einteilungen, Rasterzellen quadratischer oder hexagonaler Form (auch wabenförmig genannt, nach Kienberger et al., 2009) verwendet. Wir entschieden uns der Einfachheit halber für die quadratische Form. Die Zerlegung des Untersuchungsgebiets in Zellen erscheint uns viel geeigneter und in der Praxis einsetzbarer als die bei vorhergehenden Studien für die Metropole Lyon verwendeten räumlichen Einteilungen.

Die Zellengröße muss dem Präzisionsniveau der Daten angepasst sein, aber auch der Größe und der Problematik des Untersuchungsgebiets. Es wurde eine Seitenlänge der Quadrate von 100 m und somit eine Zellenfläche von 10 000 m² gewählt, was einen guten Kompromiss zwischen der Größe des Untersuchungsgebiets (515 km²) und der Anzahl der so geschaffenen Zellen (89804) darstellt.

Von Renard et Chapon (2010) wurde eine gröbere Zerlegung in Zellen mit einer Seitenlänge von 500 m gewählt. Obwohl die kartografischen Ergebnisse bestimmte verwundbare Sektoren deutlich machen konnten, waren die Ergebnisse für die lokalen Akteure wegen der ungenauen Wiedergabe nicht verwendbar. Eine feinere Rasterung ermöglicht, die Strukturierung der Schadenpotenziale quantitativ und qualitativ zu verbessern und somit die Uniformisierung der Information zu begrenzen, da die Schadenpotenziale innerhalb der Zelle nicht unbedingt homogen verteilt sind.

Die Schadenpotenziale werden mit Hilfe der zuvor erstellten Prioritätsfunktionen je nach ihrer Art gewichtet; eine Gewichtung abhängig von ihrer Wirkung auf dem Gebiet in jeder der Zellen ist jedoch ebenfalls erforderlich. Ein Quantifizierungsfaktor wird als dimensionslose Variable, die von 0 bis 1 geht, festgelegt. Der Wert 0 bedeutet, dass in der Zelle keine Schadenpotenziale vorliegen, und der Wert 1, dass das betreffende Schadenpotenzial in dieser Zelle im Vergleich zu den anderen Zellen in der größten Anzahl vertreten ist. Die flächenhaften Schadenpotenziale (z.B. Grundwassererfassungsgebiete), die linienförmigen (z.B. Trinkwasserversorgungsnetze) und die punktförmigen (z.B. Alleebäume) werden vom GIS in Zellenform überführt, indem jeweils ihr Flächeninhalt, ihre Länge oder die Gesamtzahl der Elemente in der Zelle durch den maximalen Flächeninhalt bzw. die maximale Länge bzw. die maximale Gesamtsumme des betrachteten Schadenpotenzials in einer der Zellen des Gebiets dividiert wird. Auf diese Weise werden die in einer Zelle vorliegenden Schadenpotenzialmengen unabhängig von ihrer Art (Fläche, Linie, Punkt) und ihrer Maßeinheit (m², m oder Summe) standardisiert. Mit den Quantifizierungsfaktoren erhält man

somit für jedes Schadenpotenzial eine vereinheitlichte Zahlenangabe (Abb. 4) sowie standardisierte Darstellungen der Vulnerabilität der Schadenpotenziale von Groß Lyon, und dies unabhängig von ihrer Art und der betrachteten Ebene der hierarchischen Aufgliederung. Abschließend wurde beschlossen, mit Vektor- statt Rasterdaten zu arbeiten, wegen der Vorteile der Ersteren (Anzeigegeschwindigkeit, reduzierter Speicherplatzbedarf, Genauigkeit, Abspeicherung ergänzender Informationen in Attribut-Tabellen, usw. ...)

### 4.4 Ein Versuch der Risikokartografierung durch die Kombination der Vulnerabilität eines Gebiets und der Naturgefahrenzonen

Im Anschluss an die Bestimmung der verschiedenen Verwundbarkeiten eines Gebiets besteht die letzte Phase dieser Studie in der Gegenüberstellung der Verwundbarkeiten und der Naturgefahrenzonen, wie sie z.B. in den örtlichen Bebauungsplänen (*Plans Locaux d'Urbanisme, PLU*) oder den Präventionsplänen für das Überschwemmungsrisiko (*Plans de Prévention des Risques d'inondation, PPRI)* festgelegt sind. Diese Gegenüberstellung muss die Vulnerabiltätszonen eines Gebiets sowie die Naturgefahrzonen so gut wie möglich respektieren, ohne deren ursprüngliche Konturen zu verändern; die beiden Informationsschichten müssen fusionieren. Diese Vorgehensweise geht somit über das einfache Überlagern der Vulnerabilitäts- und Naturgefahrschichten, zum Beispiel durch das Übereinanderdrucken von Schraffuren unterschiedlicher Farben, hinaus. Die vorgeschlagene Methode ermöglicht eine direkte Visualisierung des Risikos und nicht nur eine Überlagerung von Informationen, wie es so oft der Fall ist. Die Gegenüberstellung und die semiologische Übersetzung des Risikos kann auf verschiedene Arten erfolgen, je nach der kartografischen Abbildung des Naturgefahrenwerts. Die »Eintrittswahrscheinlichkeit [der Naturgefahr] kann qualitativ (vernachlässigbar, schwach, stark) oder quantitativ (für Überschwemmungen zum Beispiel definiert man die Zeitperioden ihres Auftretens von 10, 30 oder 100 Jahren oder mehr) bewertet werden« (Veyret and Laganier, 2013).

Es werden hier zwei Methoden der Risikodarstellung vorgeschlagen. Die Erste beruht auf dem Produkt aus der Verwundbarkeit eines Gebiets und der quantitativen Bewertung der Naturgefahr. Diese Gewichtung der Naturgefahr ist im Allgemeinen eine lineare Funktion ihrer physikalischen Parameter, wie die Intensität, die Magnitude, die Wasserhöhe, die Frequenz des Auftretens, usw. ... Die Naturgefahr wird jedoch meistens durch qualitative Kriterien bewertet (zum Beispiel: starke, mittlere oder schwache Naturgefahr), und ihre Zunahme erfolgt nicht unbedingt linear, wie man Tabelle 3 entnehmen kann. Es stellt sich in

der Tat die Frage, ob eine mittlere Naturgefahr zweimal, fünfmal oder zehnmal usw. ... stärker ist als eine schwache Naturgefahr (Tabelle 3). Deshalb ist eine zahlenmäßige Übersetzung der qualitativen Kriterien anfechtbar (zum Beispiel in Granger, 2009; Caradot et al., 2011). Außerdem erhält man letztendlich nur eine Gewichtung des Risikos, und es ist nicht erkennbar, ob dieser Wert hauptsächlich durch die Naturgefahr oder die Vulnerabilität der Schadenpotenziale entsteht. »Die Risikoberechnung durch Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit dem möglichen Schadensausmaß ist irreführend: Nach dieser Definition erhielte man das gleiche Risiko für ein seltenes Ereignis großer Magnitude und für ein häufig auftretendes Ereignis schwacher Magnitude« (Thomi, 2010). Zum Beispiel kann ein Risikowert von 10 genauso gut aus einer Naturgefahr mit dem Wert 10 und einer Vulnerabilität mit dem Wert 1, wie auch umgekehrt, resultieren (Tabelle 4).

Eine räumliche Abbildung des Risikos allein aus dem zahlenmäßigen Produkt des Naturgefahren- und des Vulnerabilitätswertes erscheint somit als unzureichend; der Grund hierfür ist die Schwierigkeit, eine zumeist qualitativ beschriebene Naturgefahr zahlenmäßig auszudrücken, und auch, weil man aus dem Risikoendwert den jeweiligen Anteil seiner Komponenten nicht mehr erkennen kann. Eine zweidimensionale gemischte Semiotik, die auf der Vereinigung der quantitativen Gewichtung der Vulnerabilität des Gebiets und den qualitativen Kriterien der Naturgefahr beruht, wird auch vorgeschlagen, um eine so genau wie mögliche Vorstellung über das Risiko zu erhalten (Tabelle 5). Die Kartenlegende in Tabellenform hat den Vorteil, dass die Werte je nach Ziel der Studie horizontal (Vulnerabilität) als auch vertikal (Naturgefahr) abgelesen werden können.

# 5 Ergebnisse der Gewichtungsfunktionen und kartografische Behandlungen

## 5.1 Kartografie der Vulnerabilitäten des Gebietes

Die erhaltenen Ergebnisse ermöglichen, die Vulnerabilität der Schadenpotenziale der Metropole Lyon durch die Erstellung von Gewichtungsfunktionen zu priorisieren. Diese fassen alle Schadenpotenziale einer gleichen Hierarchieebene zusammen, indem sie ihnen ein Gewicht abhängig von ihrer jeweiligen Vulnerabilität zuordnen. Zum Beispiel lautet die Funktion der Gesamtvulnerabilität (1) für die erste Zeile der hierarchischen Gliederung folgendermaßen:

$$\text{Vulnerabilität}_{\text{gesamt}} = 0{,}74 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Bevölkerung}} + 0{,}06 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Umwelt}} + 0{,}20 \text{ x } \text{Vul}_{\text{materielle Güter}} \qquad (1)$$

Diese Funktion zeigt den maßgeblichen Anteil der menschlichen Schadenpotenziale. Léone (2007) bezeichnet diese sogar als die »obersten zu schützenden Schadenpotenziale». Die Anteile der ökologischen und materiellen Schadenpotenziale sind jedoch nicht gleich. Nach Ansicht der Fachleute ist die Vulnerabilität der materiellen Schadenpotenziale gegenüber der Überflutung tatsächlich größer als die der ökologischen. Die Vulnerabilitätsfunktionen werden für jede Stufe auf die gleiche Art und Weise ermittelt (2). Zum Beispiel lautet die Vulnerabilitätsfunktion für die Netze:

$$\text{Vulnerabilität}_{\text{Netze}} = 0{,}22 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Trinkwasser}} + 0{,}249 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Abwasser}} + 0{,}185 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Strom}} + 0{,}085 \text{ x } \text{Vul}_{\text{chemische Produkte}} + 0{,}104 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Kraftstoffe}} + 0{,}157 \text{ x } \text{Vul}_{\text{Telekommunikation}} \qquad (2)$$

Hauptziel dieser Studie ist, die Vulnerabilität der Schadenpotenziale der Metropole Lyon in Karten abzubilden. In Abbildung 5 wird die Vulnerabilität der Bevölkerung, der Umwelt und der materiellen Güter räumlich, qualitativ und quantitativ dargestellt.

Die Vulnerabilität der Bevölkerung sowie der materiellen Güter nimmt vom Stadtzentrum zur Peripherie hin ab (Abbildung 5). Die materiellen Schadenpotenziale, wie Gebäude oder Transportinfrastrukturen, konzentrieren sich im städtischen Zentrum von Groß Lyon in den Bereichen mit hoher Bevölkerungsdichte. Diese Verteilung der materiellen Schadenpotenziale innerhalb des Siedlungsgebiets gibt auch Aufschluss auf die Verteilung der ökologischen Vulnerabilität. So findet man in Bereichen mit nur geringen materiellen Schadenpotenzialen bedeutende ökologische Schadenpotenziale und umgekehrt. Daraus folgt, dass die ökologische Vulnerabilität hauptsächlich in den Randgebieten stark ausgeprägt ist. Die Karte der Gesamtvulnerabilität (Abb. 6) gleicht der Karte der Bevölkerungsvulnerabilität, infolge der starken Gewichtung der Letzteren (74%) in der Gesamtvulnerabilitätsfunktion.

## 5.2 Kartografie der Risiken durch Überflutung und abfließendes Niederschlagswasser

Das zuvor erläuterte kartografische Verfahren wird auf das Gebiet Groß Lyon für die Risiken Überflutung (Hochwasser von Rhône und Saône) und abfließendes Niederschlagswasser (Abb. 7 und 8) angewendet, wobei beide Kartenlegenden (quantitativ und qualitativ) vorgeschlagen werden.

Diese kartografischen Darstellungen machen deutlich, wie wichtig es ist, die unterschiedliche räumliche Verteilung der Vulnerabilität der Schadenpotenziale zu berücksichtigen. Für eine

Naturgefahr, die das gesamte Hauptflussbett des Rhônes erfasst, erfordert die stark unterschiedliche räumliche Verteilung der Vulnerabilität somit ein lokal genau angepasstes Risikomanagement; wie in Abb. 7c erkennbar, verändert sich der Wert innerhalb nur eines Hektometers von 2ss auf 8ss (für zwei benachbarten Zellen) .

Es ist für die Entscheidungsträger auch sehr nützlich, eine genaue Vorstellung über die Vulnerabilität des gesamten Großraums von Lyon und nicht nur einzelner Sektoren zu erhalten, denn so gut wie die ganze Metropole ist potentiell Naturgefahren infolge von Niederschlägen ausgesetzt. Abbildung 8 zeigt das Risiko durch Niederschlagswasser im Großraum Lyon. Man kann feststellen, dass Sektoren, die von der Naturgefahr Überflutung durch die Flüsse Rhône und Saône (Abb. 7) nicht betroffen sind, stark der Naturgefahr Niederschlagswasser ausgesetzt sind, insbesondere der gesamte Nordwesten des Siedlungsgebiets.

Schließlich ist auf die Notwendigkeit eines effizienten Risikomanagements hinzuweisen, da die Zonen der höchsten Vulnerabilität nur einer sehr schwachen Naturgefahr ausgesetzt sind. Der höchste Risikowert beträgt tatsächlich nur 9s (siehe Abb. 7). Das Gleiche gilt für das Risiko Niederschlagswasser, für das die höchsten Risikowerte bei 5S und 7s liegen. Diese Vorschläge zu den Kartografierungsmethoden sollen bestimmte Schwächen vorheriger Arbeiten beheben, aber sie weisen auch Grenzen auf, die zu berücksichtigen sind.

## 5.3 Anwendungen und Grenzen der vorgeschlagenen Darstellungen

Die quantitative Kartenlegende des Risikos ist trotz ihrer zuvor erwähnten Schwächen auf den ersten Blick einfacher zu verstehen als die qualitative, bei der die Werte der zwei Komponenten direkt verbunden werden. Für das Überflutungsrisiko bietet die quantitative Kartenlegende 10 Stufen von Werten, während es bei der qualitativen Darstellung 40 sind. Diese feine Abstufung des Risikowerts stellt somit eine visuelle Schwäche, aber auch einen Vorteil in Bezug auf die Präzision dar. Darüberhinaus ist die visuelle Unterscheidung von 40 Farbstufen keine einfache Angelegenheit. Die Farbe wird als graphische Variable zur Darstellung der Vulnerabilität, und die Helligkeit zur Unterscheidung der Naturgefahrenstufe eingesetzt (Bertin, 1975). Das Gegenteil wäre auch möglich gewesen, aber es wurde vorgezogen, ein leuchtendes Rot zur Darstellung des höchsten Risikos (9S) zu verwenden. Diese Semiotik ist für das GIS besonders geeignet, denn es ist möglich, den Fokus auf eine bestimmte Zone zu richten (siehe Abb. 6c und 6d) und die Werte für eine detaillierte

Information zu kennzeichnen. Das GIS bietet außerdem die Möglichkeit, nur die stärkeren Vulnerabilitäts- oder Naturgefahrenwerte anzuzeigen und die schwächeren herauszufiltern (wie in Abb. 6d: Filterung der Vulnerabilitätswerte unter 3). Es ist anzumerken, dass infolge der Universalität der vorgeschlagenen Kartenlegende die potentiellen Risikowerte nicht unbedingt vollständig anzutreffen sind, da in einem Gebiet nicht immer alle Risikokombinationen auftreten (dies gilt insbesondere für die höheren Werte, besonders bei einem effizienten Risikomanagement). Für das Risiko Niederschlagswasser trifft man im Gebiet der Metropole Lyon die Werte 6S, 7S, 8s, 8S, 9s und 9S nicht an; für das Risiko der Überflutung liegen für die Naturgefahren von 6 bis 9 die Werte von s bis S, sowie die komplette 10. Risikostufe nicht vor (siehe Abb. 6 und 7).

## 6. Schlussfolgerungen

Lange Zeit stützte sich das Risikomanagement nur auf die Kenntnis und die Beherrschung der Naturgefahr. Die Risikokarten entsprachen häufig einer Einteilung in Zonen, die einer bestimmten Naturgefahr ausgesetzt sind. Der seit kürzerer Zeit anzutreffende Begriff der Vulnerabilität eines Gebiets wird jetzt von zahlreichen wissenschaftlichen Fachrichtungen sowie von lokalen Akteuren und gewählten Vertretern geteilt. Heute erscheint die Vulnerabilität als ein vollwertiges Forschungsgebiet. Die Studien zur Verbesserung der Kenntnisse über die Vulnerabilität haben ihre Nützlichkeit, aber auch ihre Grenzen gezeigt. Deshalb schlugen wir im ersten Schritt ein Verfahren vor, dessen Ziel es ist, die Vulnerabilität räumlich auf qualitative wie auf quantitative Weise zu bewerten, und das an alle Arten von Naturgefahren und Auftrittsorte anpassbar ist. Hierbei wurden die Diversität der auf dem Gebiet vorhandenen Schadenpotenziale berücksichtigt und Methoden der Entscheidungshilfe sowie eine geoinformatische Verarbeitung durch GIS eingesetzt. Anschließend wurde eine lokale Kartografie des Risikos vorgeschlagen, die auf den Ergebnissen der Vulnerabilitätsabschätzung eines Gebietes basiert und die ausgewiesenen Naturgefahrenzonen respektiert. Dies wurde durch den Einsatz neuartiger geoinformatischer Verfahren möglich, die eine Koppelung dieser beiden Variablen erlauben. Die Notwendigkeit eines ausgesprochen lokalisierten Risikomanagements abhängig von der Vulnerabilität des betrachteten Gebiets wurde hiermit deutlich herausgestellt. Darüberhinaus wurden abhängig von der geforderten Genauigkeit des Risikoniveaus zwei unterschiedliche Kartenlegenden (quantitativ und qualitativ) vorgeschlagen.

Die vorliegende Arbeit weist zahlreiche Perspektiven auf. In erster Linie müssten die Anfälligkeitsfaktoren der materiellen und ökologischen Schadenpotenziale berücksichtigt werden. Weiterhin ist die Mobilität des menschlichen Schadenspotenzials zu untersuchen, insbesondere um Karten für die Vulnerabilität der Bevölkerung vorzuschlagen, die nach Wochentagen (Unterscheidung Arbeitstage - Wochenende) und Tageszeiten (Tag - Nacht) differenzieren. Letztlich schlägt diese Methode den Akteuren des Risikomanagements ein neuartiges Werkzeug zur räumlichen Visualisierung des Risikos vor, das jedoch einen gewissen Lernprozess erfordert und mit Vorsicht zu handhaben ist.

## Danksagung

Unser herzlichster Dank gilt den Korrekturlesern, die zur Verbesserung dieses Textes beigetragen haben.

## Literaturverzeichnis

Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise: Risques technologiques et vulnérabilités dans l'agglomération lyonnaise, 2005.

Becouze-Lareure, C.: Multi-Level Approach of the Ecotoxicological Impact of a Combined Sewer Overflow on a Peri-Urban Stream, J. Water Resour. Prot., 04(11), 984–992, doi:10.4236/jwarp.2012.411114, 2012.

Bertin, J.: La Graphique et le traitement graphique de l'information, Flammarion, Paris, 1975.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B.: At Risk: Natural Hazards, People, Vulnerability, and Disasters, Routledge., London, UK, 1994.

Blancher, P., Paquiet, P. and Zampa, C.: Industries chimiques et territoire: contraintes et opportunités de développement/Chemical industries and their spatial setting: constraints and opportunities for development, Rev. Géographie Lyon, 71(1), 23–30, 1996.

Bourrelier, P.-H.: Introduction du n° 43 de Responsabilité et environnement, Responsab. Environ., 2, 2006.

Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S. and Michel, K.: Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-

sized periurban catchment in France, J. Hydrol., 485, 5–23, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.049, 2013.

Caradot, N., Granger, D., Chapgier, J., Cherqui, F. and Chocat, B.: Urban flood risk assessment using sewer flooding databases, Water Sci. Technol., 64(4), 832, doi:10.2166/wst.2011.611, 2011.

Cherqui, F.: Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier. Méthode Adequa, thèse, Université de La Rochelle, La Rochelle., 2005.

Chocat, B.: Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, Tech & Doc., Lavoisier, Paris., 1997.

Combe, C.: La ville endormie ? Le risque d'inondation à Lyon. Approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain, thèse, Université Lumière Lyon 2., 2007.

Dauphiné, A. and Provitolo, D.: Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer, Armand Colin, Paris, 2013.

Demoraes, F. and D'Ercole, R.: Risques et accessibilité des lieux dans le District Métropolitain de Quito (Équateur), Mappemonde, (95 (3-2009)), 1–20, 2009.

D' Ercole, R. and Pigeon, P.: L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique/~~Geographical relevance of natural risk assessment on an international scale, Ann. Géographie, 108(608), 339–357, doi:10.3406/geo.1999.21777, 1999.

Fedeski, M. and Gwilliam, J.: Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology, Landsc. Urban Plan., 83(1), 50–61, doi:10.1016/j.landurbplan.2007.05.012, 2007.

Fuchs, S., Birkmann, J. and Glade, T.: Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges, Nat. Hazards, 64(3), 1969–1975, doi:10.1007/s11069-012-0352-9, 2012.

Füssel, H.-M. and Klein, R. J. T.: Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking, Clim. Change, 75(3), 301–329, doi:10.1007/s10584-006-0329-3, 2006.

Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A.,

Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D. and Viglione, A.: A compilation of data on European flash floods, J. Hydrol., 367(1–2), 70–78, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028, 2009.

Gilbert, C.: L'expertise et la science, in atelier RDT, pp. 61–63., 2006.

Gleyze, J. F. and Reghezza, M.: La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d`endommagement, Géocarrefour Rev. Géographie Lyon, 82(1), 17–26, 2007.

Granger, D.: Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines, thèse, INSA de Lyon, Lyon., 2009.

Griot, C.: Vulnérabilité et risques liés au transport de matières dangereuses: évaluation en vue de la préparation aux interventions de la Sécurité Civile, thèse, Montpellier 3, Montpellier, 2003.

Griot, C.: Des territoires vulnérables face à un risque majeur : le transport de matières dangereuses. Proposition d'un outil d'aide à la gestion de crise, Géocarrefour, 82(1-2), 51–63, 2007.

Griot, C. and Ayral, P.-A.: Terminologie en sciences du risque, p. 87, Mèzes, France., 2001.

Haziza, E.: Contribution au développement de stratégies préventives face au risque de crues éclairs, thèse, Ecole des Mines de Paris, Paris., 2007.

IPCC: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press., 2012.

Jongman, B., Koks, E. E., Husby, T. G. and Ward, P. J.: Increasing flood exposure in the Netherlands: implications for risk financing, Nat Hazards Earth Syst Sci, 14(5), 1245–1255, doi:10.5194/nhess-14-1245-2014, 2014.

Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M. and Keiler, M.: Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology, Appl. Geogr., 32(2), 577–590, doi:10.1016/j.apgeog.2011.07.002, 2012.

Kaźmierczak, A. and Cavan, G.: Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure, Landsc. Urban Plan., 103(2), 185–197, doi:10.1016/j.landurbplan.2011.07.008, 2011.

Kendrick, J. D. and Saaty, D.: Use analytic hierarchy process for project selection, in ASQ Six Sigma Forum Magazine, pp. 22–29, 2007.

Kienberger, S., Lang, S., Zeil, P. and others: Spatial vulnerability units-expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria., Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9(3), 767–778, 2009.

Koks, E. E., Jongman, B., Husby, T. G. and Botzen, W. J. W.: Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management, Environ. Sci. Policy, 47, 42–52, doi:10.1016/j.envsci.2014.10.013, 2015.

Kouyi, G. L., Bret, P., Didier, J.-M., Chocat, B. and Billat, C.: The use of CFD modelling to optimise measurement of overflow rates in a downstream-controlled dual-overflow structure, Water Sci. Technol., 64(2), 521, doi:10.2166/wst.2011.162, 2011.

Kreimer, A., Arnold, M. and Carlin, A.: Building safer cities: the future of disaster risk, World Bank Publications, 2003.

Kron, W.: Flood risk = hazard × exposure × vulnerability, in Flood defense, Wu et al., New-York., 2002.

Léone, F.: Caractérisation des vulnérabilités aux » catastrophes naturelles »: contribution à une évaluation géographique multirisque, HDR, université de Montpellier III, Montpellier., 2007.

Lepioufle, J.-M., Leblois, E. and Creutin, J.-D.: Variography of rainfall accumulation in presence of advection, J. Hydrol., 464–465, 494–504, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.07.041, 2012.

Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Prat, M. A., Porcú, F., Price, C., Mugnai, A., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Katsanos, D., Michaelides, S., Yair, Y., Savvidou, K. and Nicolaides, K.: High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database, Adv Geosci, 23, 47–55, doi:10.5194/adgeo-23-47-2010, 2010.

Lummen, N. S. and Yamada, F.: Implementation of an integrated vulnerability and risk assessment model, Nat. Hazards, 73(2), 1085–1117, doi:10.1007/s11069-014-1123-6, 2014.

Marchi, L., Borga, M., Preciso, E. and Gaume, E.: Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management, J. Hydrol., 394(1–2), 118–133, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.017, 2010.

Marzo, E., Busini, V. and Rota, R.: Definition of a short-cut methodology for assessing the vulnerability of a territory in natural–technological risk estimation, Reliab. Eng. Syst. Saf., 134, 92–97, doi:10.1016/j.ress.2014.07.026, 2015.

Meschinet de Richemond, N. and Reghezza, M.: La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ?, Ann. Géographie, 673(3), 248–267, doi:10.3917/ag.673.0248, 2010.

Messner, F. and Meyer, V.: Flood damage, vulnerability and risk perception–challenges for flood damage research, NATO Science Series,Springer, Netherlands, 2006.

Moser, S. C.: Now more than ever: the need for more societally relevant research on vulnerability and adaptation to climate change, Appl. Geogr., 30(4), 464–474, 2010.

November, V.: Les territoires du risque : le risque comme objet de réflexion géographique, Peter Lang., Berne., Suisse, 2002.

O'Brien, K., ERIKSEN, S., NYGAARD, L. P. and SCHJOLDEN, A.: Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses, Clim. Policy, 7(1), 73–88, doi:10.1080/14693062.2007.9685639, 2007.

Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C. and Mouton, F.: Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9(4), 1149–1159, 2009.

Penning-Rowsell, E., Floyd, P., Ramsbottom, D. and Surendran, S.: Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework, Nat. Hazards, 36(1-2), 43–64, 2005.

Poussin, J. K., Bubeck, P., Aerts, J. C. J. H. and Ward, P. J.: Potential of semi-structural and non-structural adaptation strategies to reduce future flood risk: case study for the Meuse, Nat Hazards Earth Syst Sci, 12(11), 3455–3471, doi:10.5194/nhess-12-3455-2012, 2012.

Propeck-Zimmermann, E., Saint-Gérand, T. and Bonnet, E.: Nouvelles approches ergonomiques de la cartographie des risques industriels, Mappemonde, 4(96), 19, 2009.

Reghezza, M.: Géographes et gestionnaires face à la vulnérabilité métropolitaine. Quelques réflexions autour du cas francilien, Ann. Géographie, 669(5), 459–477, doi:10.3917/ag.669.0459, 2009.

Renard, F.: Le risque pluvial en milieu urbain. De la caractérisation de l'aléa à l'évaluation de la vulnérabilité: le cas du Grand Lyon, thèse, Université Jean Moulin Lyon 3, Lyon., 2010.

Renard, F. and Chapon, P.-M.: Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise, L'Espace Géographique, 39(1), 35–50, 2010.

Rufat, S.: L'estimation de la vulnérabilité urbaine, un outil pour la gestion du risque, Géocarrefour, 82(1-2), 7–16, doi:10.4000/geocarrefour.1397, 2007.

Ruin, I. and Lutoff, C.: Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise, Houille Blanche, (6), 114–119, doi:10.1051/lhb:200406016, 2004.

Saaty, T. L.: The Analytic Hierarchy Process, Mc Graw-Hill, New-York., 1980.

Saaty, T. L.: Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process, Eur. J. Oper. Res., 74(3), 426–447, 1994.

Shi, W. and Zeng, W.: Genetic k-Means Clustering Approach for Mapping Human Vulnerability to Chemical Hazards in the Industrialized City: A Case Study of Shanghai, China, Int. J. Environ. Res. Public. Health, 10(6), 2578–2595, doi:10.3390/ijerph10062578, 2013.

Tarolli, P., Borga, M., Morin, E. and Delrieu, G.: Analysis of flash flood regimes in the North-Western and South-Eastern Mediterranean regions, Nat Hazards Earth Syst Sci, 12(5), 1255–1265, doi:10.5194/nhess-12-1255-2012, 2012.

Thomi, L.: Rôle des paramètres sociopolitiques et des connaissances dans la gestion des risques hydrologiques, thèse, Université de Lausanne, Lausanne, 2010.

Tixier, J., Dandrieux, A., Dusserre, G., Bubbico, R., Mazzarotta, B., Silvetti, B., Hubert, E., Rodrigues, N. and Salvi, O.: Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project, J. Hazard. Mater., 130(3), 251–264, 2006.

UNISDR: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Revealing Risk, Redefining Development, United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat, Geneva, Switzerland, 2011.

Veyret, Y. and Laganier, R.: Atlas des risques en France. Prévenir les catastrophes naturelles et technologiques, Autrement, 2013.

Veyret, Y. and Reghezza, M.: Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité, Ann. Mines, 7, 2006.

Tabelle 1: Bei der multikriteriellen Analyse anwendbare Gewichtungsmethoden (angepasst von Cherqui, 2005)

| ***Vorteile*** | ***Nachteile*** |
|---|---|
| **Paarweiser Vergleich**<br><br>*Paarweiser Vergleich der Kriterien* | |
| Einfache Anwendung; die Konsistenz aller Vergleiche wird überprüft; die Komplexität der realen Welt ist erfassbar. | Der Zeitaufwand für den Vergleich nimmt schneller zu als die Anzahl der Kriterien. |
| **Kartenspieltechnik**<br><br>*Ein Satz Spielkarten mit den Namen der Kriterien sowie weiße Karten werden ausgeteilt. Der Entscheider ordnet die Karten; er kann Karten an die gleiche Stelle setzen oder weiße Karten zwischen den Kriterien einfügen.* | |
| Einfache Anwendung | Schwierigkeit, die gesamte Komplexität der Realität zu erfassen. Die erhaltene Gewichtung spiegelt nicht systematisch<br><br>die Wichtigkeitsunterschiede der Kriterien wieder. |
| **Punktabfragemethode**<br><br>*Verteilung einer Summe von Punkten auf alle Kriterien* | |
| Die Zuteilung eines höheren Gewichts an ein Kriterium verringert die relative Wichtigkeit eines anderen Elements. | Gleiche Nachteile wie die Kartenspieltechnik |
| **Gewichtungsbaum**<br><br>*Wenn die einzelnen Kriterien in Form einer Baumstruktur angeordnet werden können, entspricht dann - ausgehend von der Gewichtung jeder Verzweigung - der Gewichtungswert eines jeden Kriteriums dem Produkt aus den Koeffizienten der Unterzweige und der Zweige, aus dem es hervorgeht.* | |
| Begrenzte Anzahl der zu vergleichenden Elemente. | Die Erstellung der Baumstruktur ist schwierig. |
| **Urteilsanalyse**<br><br>*Beurteilung der Wichtigkeit von verschiedenen reellen oder fiktiven Alternativen nach verschiedenen* | |

| *Maßstäben.* | |
|---|---|
| Die Gewichtungen sind abhängig vom zu Tage tretenden Verhalten der Akteure und nicht von ihren offiziellen Präferenzen; die Methode ermöglicht die indirekte Berücksichtigung von Parametern. | Um eine statistische Bedeutung zu erhalten, ist eine hinreichend große Anzahl an Alternativen zu untersuchen. Die Methode führt manchmal dazu, die kognitive Kapazität der Entscheidungsträger bei einer großen Anzahl von Alternativen zu überschätzen. Zeitaufwendig |

Tabelle 2: Binäre Vergleichsskala zur Bewertung der Vulnerabilität eines Gebiets (angepasst von Saaty, 1980)

| **Numerische Gewichtung** | **Verbale Gewichtung** |
|---|---|
| 1 | Gleiche Vulnerabilität der beiden Elemente |
| 3 | Ein Element ist etwas verwundbarer als das andere |
| 5 | Ein Element ist verwundbarer als das andere |
| 7 | Ein Element ist viel verwundbarer als das andere |
| 9 | Ein Element ist sehr viel verwundbarer als das andere |
| 2, 4, 6, 8 | Zwischenwerte zwischen zwei benachbarten Einschätzungen |
| 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9 | Reziproke Werte der vorhergehenden Einschätzungen |

Tabelle 3: Mögliche zahlenmäßige Übersetzungen der qualitativen Einschätzung einer Naturgefahr

| | **Naturgefahr** | | |
|---|---|---|---|
| **Qualitative Einschätzung** | schwach | mittel | stark |
| **Quantitative Übersetzung** | 1 | 2 | 3 |
| | 1 | 5 | 10 |
| | 1 | 10 | 100 |
| | ? | ? | ? |

Tabelle 4: Quantitative Einschätzung eines Risikos durch das Produkt aus den Zahlenwerten der Naturgefahr und der Vulnerabilität (es ist z.B. nicht erkennbar, ob ein Endwert von 10 aus einem hohen Naturgefahr- oder Vulnerabilitätswert hervorgeht)

| | | **Wert der Naturgefahr** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **1** | **5** | **10** |
| **Wert der Vulnerabilität** | **1** | 1 | 5 | 10 |
| | **5** | 5 | 25 | 50 |
| | **10** | 10 | 50 | 100 |

Tabelle 5: Gemischte Risikoeinschätzung aus dem Produkt einer qualitativen Naturgefahreinschätzung und eines zahlenmäßigen Vulnerabilitätswerts (Hier ist im Unterschied zu Tabelle 3 der jeweilige Anteil der beiden Risikokomponenten zur optimalen Risikokenntnis beibehalten und erkennbar).

| | | **Wert der Naturgefahr** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **schwach (f)** | **mittel (m)** | **stark (F)** |
| **Wert der Vulnerabilität** | **1** | 1f | 5m | 10F |
| | **5** | 5f | 25m | 50F |
| | **10** | 10f | 50m | 100F |

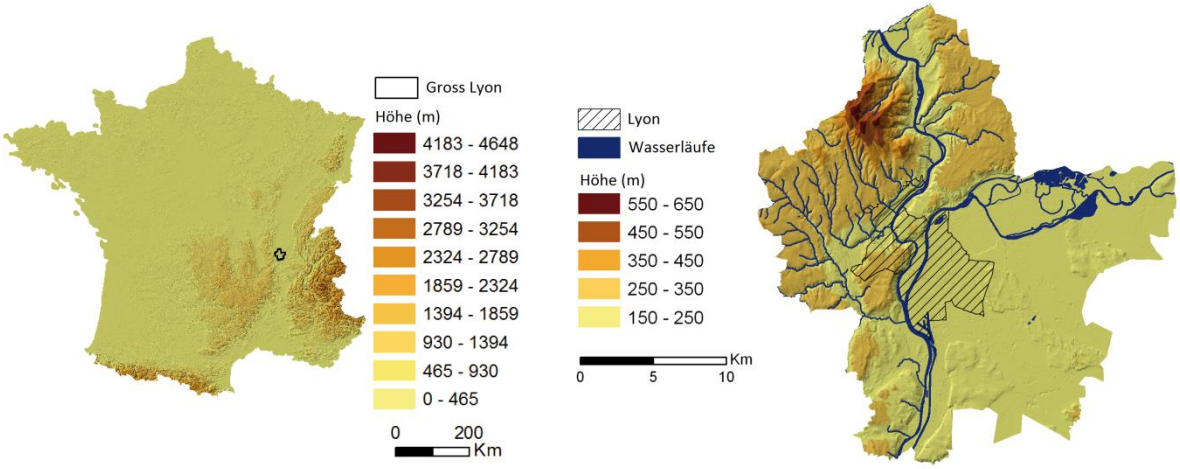


Abbildung 1: Lage der Metropole Lyon in Frankreich (links), und Details ihrer Topografie und Hydrologie (rechts)

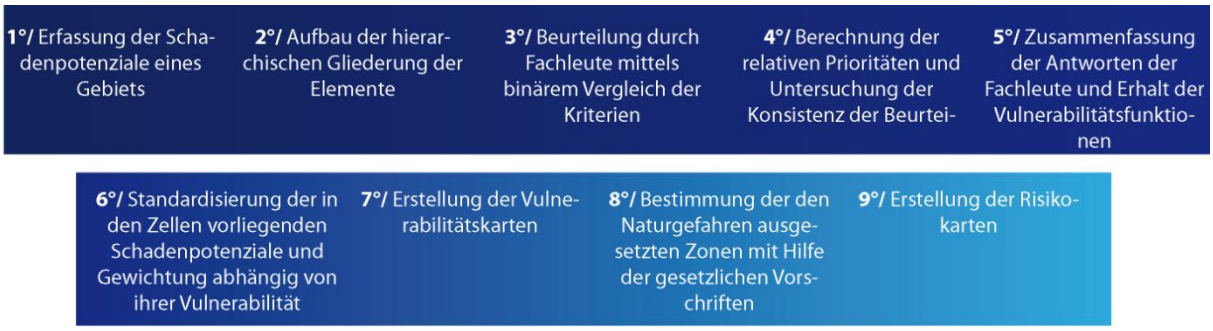


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Methodologie

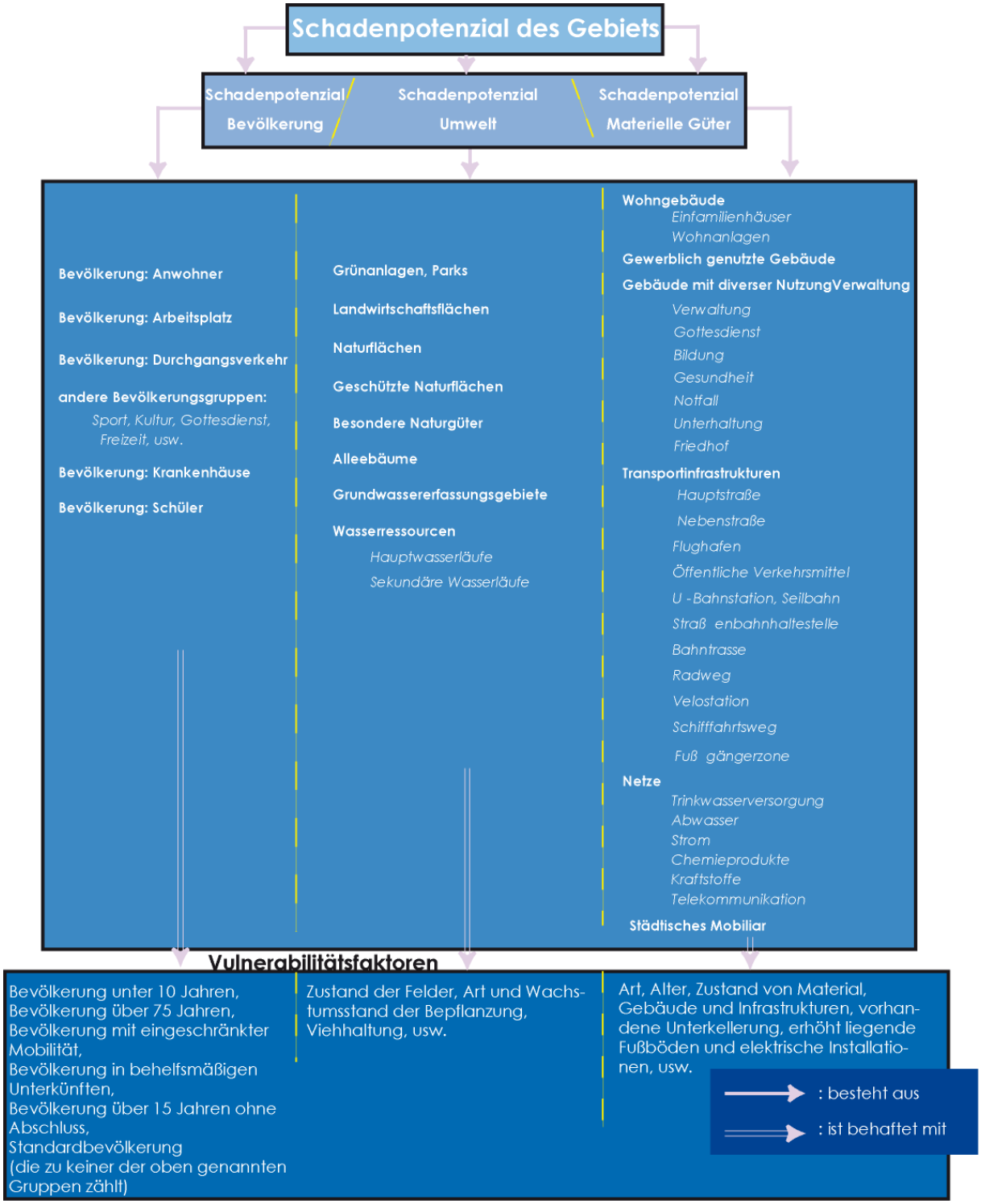


Abbildung 3: Allgemeine hierarchische Aufgliederung des räumlichen Systems der Lyoner Vulnerabilität

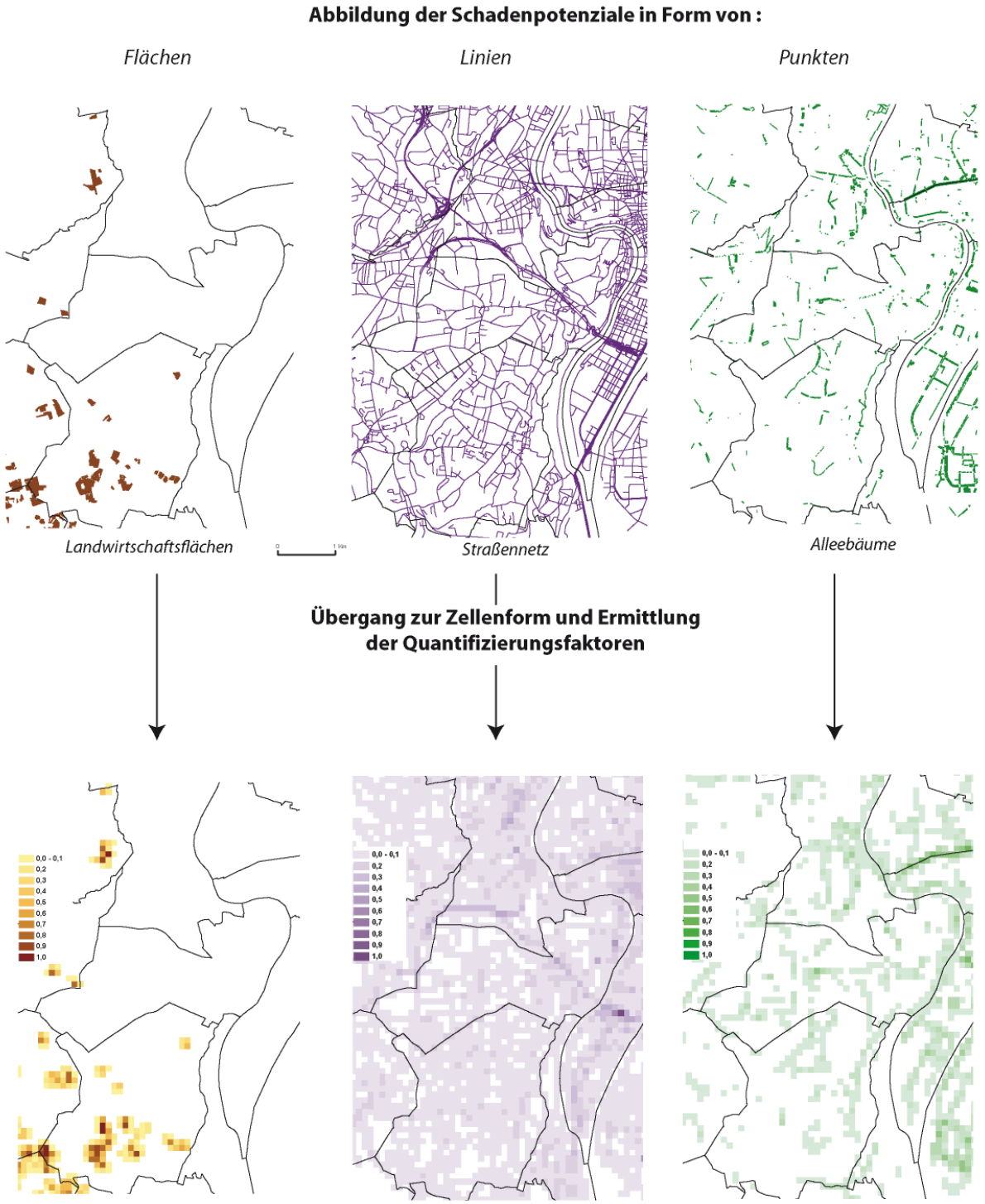


Abbildung 4: Beispiele zur Umwandlung von flächen-, linien- oder punktförmig dargestellten Schadenpotenzialen in Zellenform

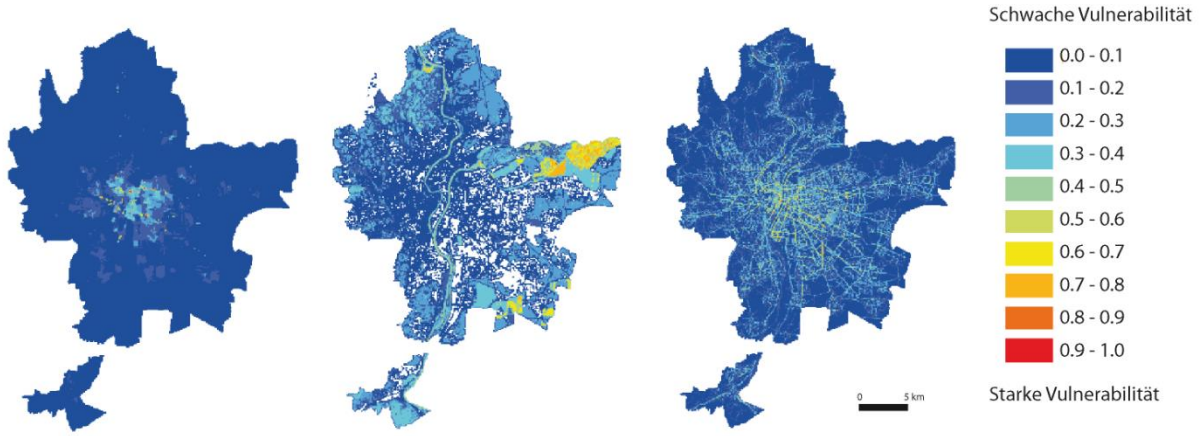


Abbildung 5: Vulnerabilität der Bevölkerung (links), der Umwelt (Mitte) und der materiellen Güter (rechts)

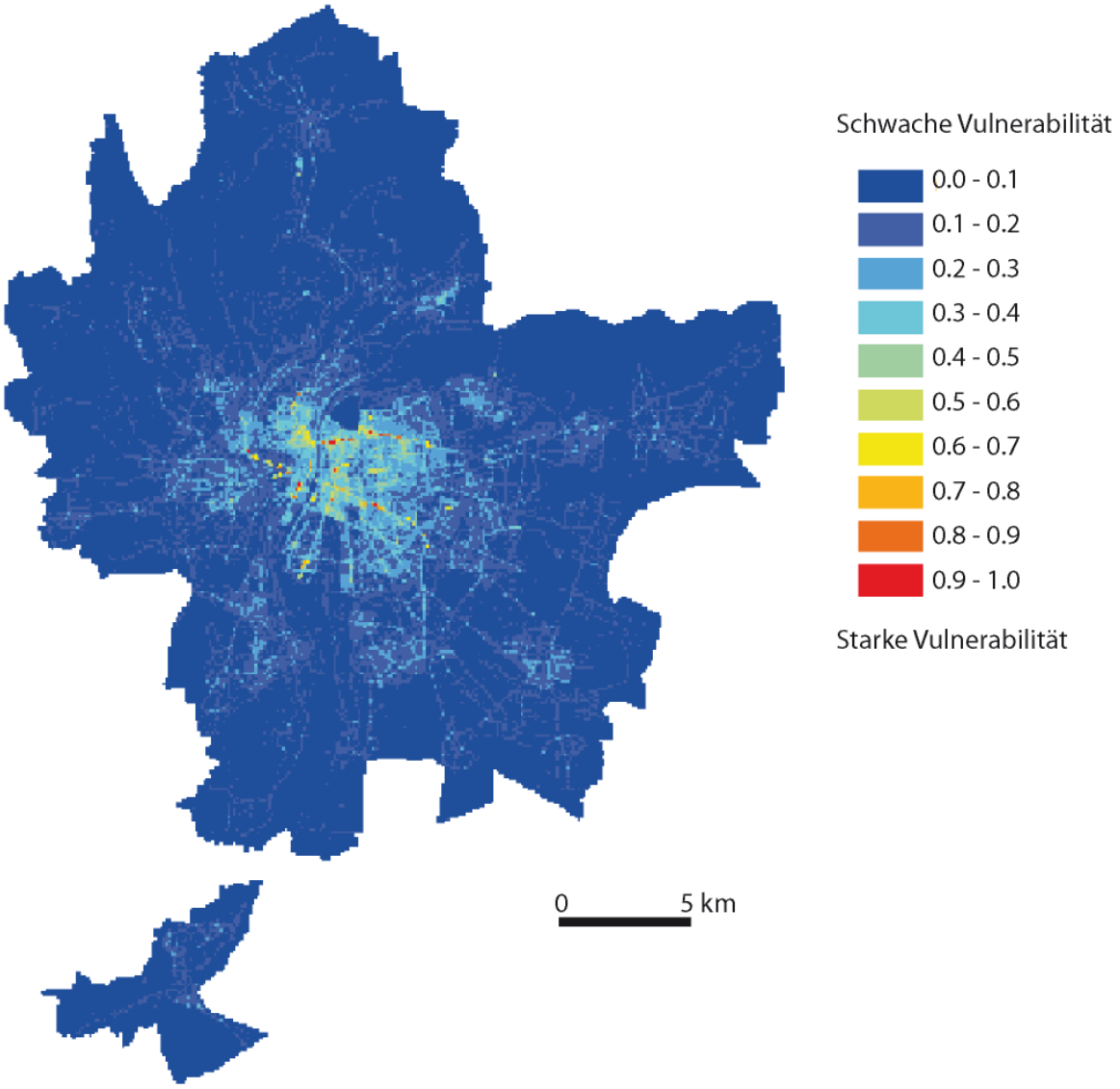


Abbildung 6: Vulnerabilität des Gebiets Groß Lyon

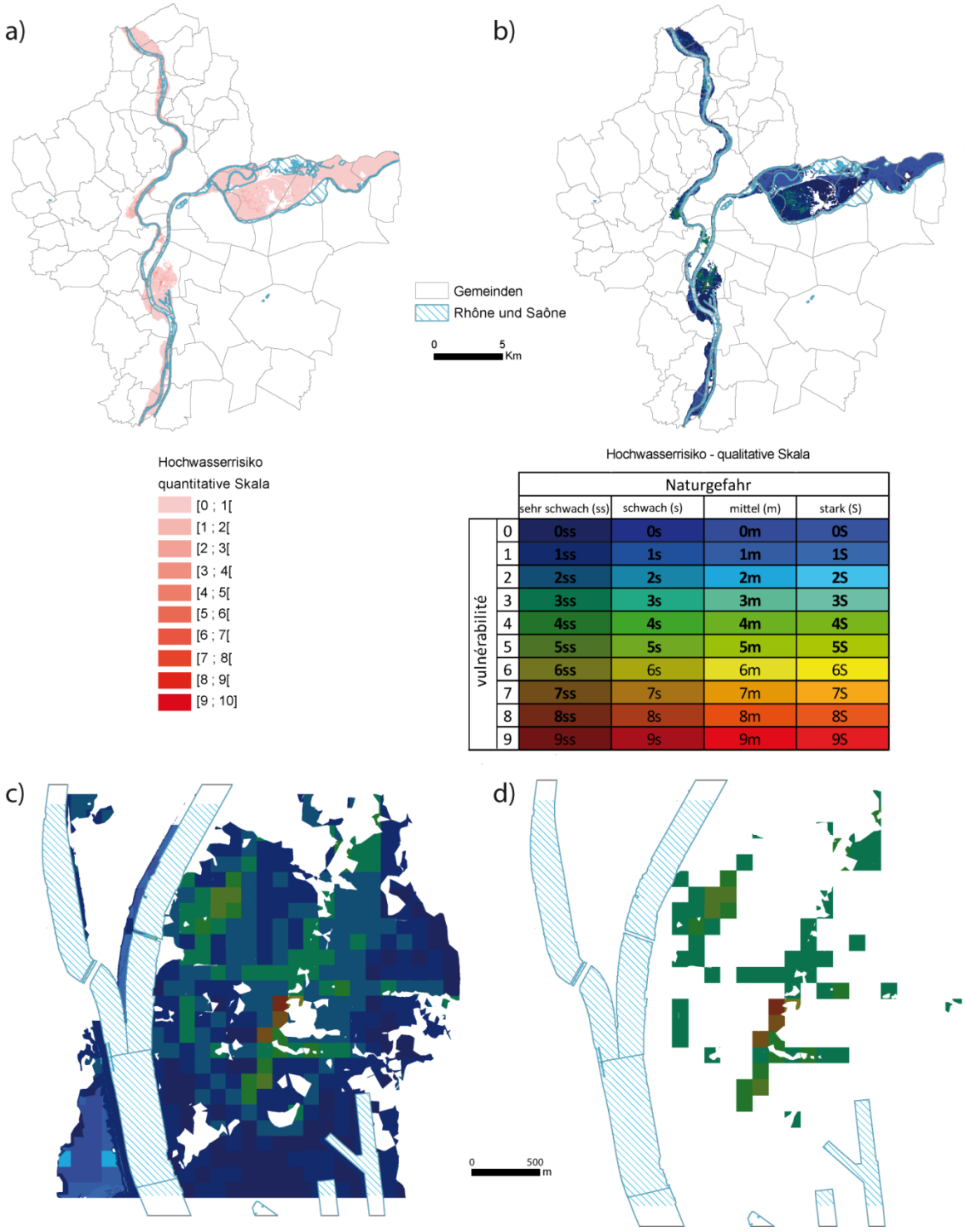


Abbildung 7: Überflutungsrisiko von Rhône und Saône **a)** quantitative Darstellung; **b)** qualitative Darstellung (Verbindung des Vulnerabilitätswerts und der Naturgefahrstärke); **c)** Zoom von b) auf das Zentrum von Lyon am Zusammenfluss von Rhône und Saône (nur die

fettgedruckten Werte der Kartenlegende sind effektiv in diesem Ausschnitt vorhanden); **d)** identisch zu c) mit Filterung der Vulnerabilitätswerte unter 3

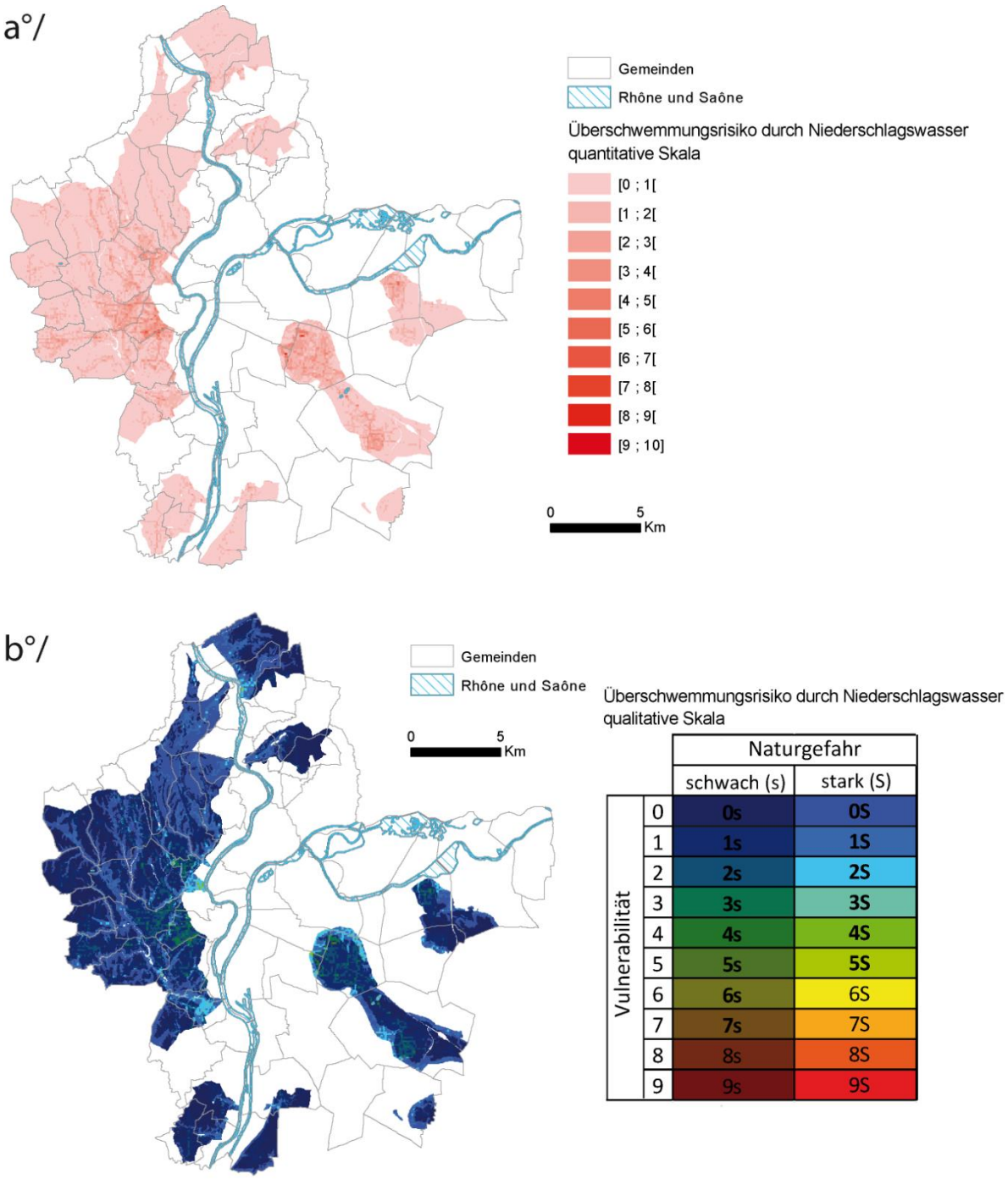


Abbildung 8: Risiko durch abfließendes Niederschlagswasser Quantitative (a°/) und qualitative (b°/) Darstellung: Verbindung des Vulnerabilitätswerts und der Naturgefahrstärke - nur die fettgedruckten Werte sind effektiv in dieser Abbildung vorhanden).