

Mobilfunkdaten-gestützte Analyse des Mobilitätsverhaltens infolge extremer Wettersituationen

Michael Haberl, Florian Fuchs, Kevin Winter, Markus Streibl, Michael Cik

(MSc. Michael Haberl, Invenium Data Insights GmbH, Herrengasse 28, A-8010 Graz, michael.haberl@invenium.io)

(MSc. Florian Fuchs, Invenium Data Insights GmbH, Herrengasse 28, A-8010 Graz, forian.fuchs@invenium.io)

(MSc. MSc. MA. Kevin Winter, Invenium Data Insights GmbH, Herrengasse 28, A-8010 Graz, kevin.winter@invenium.io)

(MSc. Markus Streibl, Invenium Data Insights GmbH, Herrengasse 28, A-8010 Graz, markus.streibl@invenium.io)

(Dr. Michael Cik, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz, Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz, michael.cik@tugraz.at)

1 ABSTRACT

Extreme Wetterbedingungen, wie starke Regen- oder Schneefälle, aber auch Hochwasserereignisse und einhergehende Überschwemmungen, können sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen auf das Verkehrsverhalten und die Mobilitätsmuster, sowie auch auf die Nutzung der Verkehrsinfrastruktur und des urbanen und ruralen Verkehrsangebotes haben. Die Auswirkungen von extremen Wetterbedingungen auf die Mobilität können sowohl kurzfristig und temporär während eines akuten Ereignisses beobachtet werden, aber auch langfristige Veränderungen in den Mobilitätsgewohnheiten durch nachhaltige Verhaltensanpassungen bewirken. Gerade im Zuge des akuten Auftretens eines extremen Unwetterereignisses steht die Sicherheit der Bevölkerung an erster Stelle. Damit ist ein Monitoring der stationären Aufenthaltsorte und auch der Bewegungsströme der Bevölkerung während dieser kritischen Zeiträume von zentraler Wichtigkeit, um zeitnah sicherheitsrelevante Maßnahmen im Verkehrsmanagement treffen zu können. Neben einer zeitnahen Vulnerabilitätsanalyse, spielt auch die gezielte Analyse der Infrastrukture resilienz eine wichtige Rolle. Zudem ermöglicht ein Monitoring des Mobilitätsverhaltens infolge extremer Wettersituationen auch eine datengetriebene Krisenkommunikation und ermöglicht die Ableitung von eventuell notwendigen Evakuierungsstrategien.

Um die zu setzenden Maßnahmen im Extremfall mit einer ausreichend genauen Datengrundlage unterstützen zu können, bieten sich flächendeckend verfügbare Mobilfunkdaten an, die bereits regelmäßig für die strategische Verkehrsplanung genutzt werden. Diese Daten ermöglichen die Analyse der Aufenthaltsstandorte und Mobilitätsmuster der Bevölkerung in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, siehe Dujardin et al. (2020). Die anonymisierten Handysignalisierungsdaten werden dabei durch die aktive und passive Nutzung des Mobilfunknetzes erhoben. Durch die Analyse der Mobilfunkdaten können die Bewegungsströme und Bevölkerungsdichten überwacht und bei extremen Wettersituationen entsprechende Maßnahmen zur Verkehrslenkung, wie beispielsweise Straßensperren und gezielte Umleitungen, angeordnet werden. Zudem ermöglicht die Mobilfunkdatenanalyse eine Überwachung der Evakuierungsbewegungen und kann die Effektivität der Sicherheitsmaßnahmen durch ex-post Analysen erhöhen. Behörden können überprüfen, wie Menschen auf Warnungen und Evakuierungsbefehle reagieren und ob Evakuierungen effizient, zeitgerecht und zielgerichtet durchgeführt werden. Mithilfe der Analysemethodik können zudem auch Muster der täglich stattfindenden Bewegungen untersucht und die Änderungen und Anomalien bei extremen Wettersituationen durch den Vergleich mit historischen Daten in Normalwetterlagen analysiert werden, um frühzeitig Anzeichen von Überlastungsanzeichen der Infrastruktur zu erkennen.

Der Beitrag behandelt die Entwicklung einer mobilfunkbasierten Near-Real-Time-Anwendung und analysiert die Bewegungsströme und Bevölkerungsdichten an neuralgischen Standorten im Zuge der Hochwasserereignisse in Österreich im September 2024. Near-Real-Time ermöglicht es, das Personenaufkommen an spezifischen Standorten kritischer Infrastrukturelemente (Brücken, Staudämme, etc.) mit nur wenigen Minuten Verzögerung zu analysieren. Fast in Echtzeit kann damit beantwortet werden, wie viele Personen sich an einem kritischen Standort aufhalten und es können sicherheitsrelevante Maßnahmen getroffen werden. Die entwickelten Mobilfunkdaten-gestützten Analysen setzen damit einen Meilenstein bei der Etablierung einer dynamischen Expositionsanalyse und bieten wertvolle Einblicke in die Auswirkungen von Wetterereignissen, indem sie Bewegungsmuster und Aufenthaltsorte in Echtzeit analysierbar machen. Darauf aufbauend lassen sich entsprechende Vulnerabilitäts- und Expositionsarten der bewegenden und stationären Bevölkerungsdichten im Sinne einer Risikokartierung dynamisch und ohne lange Latenzzeiten aufbereiten. Die Analysen können somit wichtige Informationen liefern, um Städte besser auf extreme Wetterereignisse vorzubereiten, den Verkehr zu optimieren und die öffentliche Sicherheit zu erhöhen.

Keywords: Vulnerabilitätsanalysen, Mobilitätsverhalten, Mobilfunkdaten, Expositionsarten, Infrastrukture resilienz

2 EINLEITUNG

Die Anpassung von Städten an die Auswirkungen des Klimawandels ist von großer Bedeutung, denn städtische Gebiete sind aufgrund ihrer Bevölkerungskonzentration sowie ihrer Schlüsselrolle in wirtschaftlichen, politischen und sozialen Prozessen besondere Hochrisikozonen. Der Diskurs über die Anpassung von Städten an den Klimawandel hat jedoch erst in jüngster Zeit in Politik und Wissenschaft an Dynamik gewonnen. Die Europäische Kommission widmet sich intensiv dem Thema zur „Bewältigung von Klimarisiken – Schutz der Menschen und des Wohlstands“ in deren Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.¹ In der Studie von Birkmann et al. (2010) wurden bereits Anpassungsstrategien an den Klimawandel in neun ausgewählten Städten untersucht und hinsichtlich ihrer allgemeinen Vision und Ziele, der verwendeten Ausgangsdaten, der direkten und indirekten Auswirkungen, der vorgeschlagenen strukturellen und nicht-strukturellen Maßnahmen sowie der Einbeziehung formeller und informeller Akteure analysiert. Die weiterführende Studie von Birkmann et al. (2012) vertiefte die Vulnerabilität verschiedener gesellschaftlicher Gruppen gegenüber Hochwassersituationen im vietnamesischen Mekong-Delta, das stark von den Risiken des Klimawandels betroffen ist. Die Studie leistete einen zentralen Beitrag zur Methodenentwicklung und einzuhaltende Datenqualität für eine umfassende Vulnerabilitätsbewertung, die als Grundlage für zukünftige Anpassungsstrategien dienen kann. Sie verbindet zudem die bestehenden Diskurse zu Katastrophenvorsorge und Anpassung an den Klimawandel.

Die Technologie zur Bestimmung des geografischen Standorts von Mobiltelefonen und anderen tragbaren Geräten wird zunehmend verfügbarer. Nach Ratti et al. (2006) ermöglicht sie eine Vielzahl von Anwendungen, die unter dem Begriff Location Based Services (LBS) zusammengefasst werden und sich zu einem mächtigen Werkzeug für die Stadtanalyse entwickeln können, um aggregierte Daten in Städten abzurufen. Auch Mateos und Fischer (2007) haben schon früh auf die Bedeutung einer ausreichenden raumzeitlichen Genauigkeit bei der Lokalisierung von Mobiltelefonen in diesem Zusammenhang hingewiesen. So wurden in der Studie von Pulselli et al. (2008) Verkehrsdaten, die von Mobilfunkantennen aufgezeichnet wurden, verwendet, um eine Echtzeit-Überwachungstechnik für die Bevölkerungsdichte in einem städtischen Gebiet zu entwickeln. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Intensität der Aktivität in einer Mobilfunkzelle direkt proportional zur Anwesenheit von Mobilfunknutzern ist.

Deville et al. (2014) zeigte, dass Daten von Mobilfunknetzbetreibern genutzt werden können, um genaue und detaillierte Bevölkerungskarten zu erstellen. Diese Daten bieten laut der Studie eine wertvolle Ressource für die Planung von Maßnahmen in Bereichen wie Gesundheit der Bevölkerung, Klimawandel, Konflikte und auch Naturkatastrophen.

Insbesondere in einkommensschwachen Ländern, in denen Daten zur Bevölkerungsverteilung spärlich vorhanden, veraltet und unzuverlässig sein können, ermöglicht die Verwendung von Mobilfunkdaten eine gute Schätzung der Bevölkerungsdichte, vgl. Tatem und Linard (2011). Der Zugang zu anonymisierten Mobilfunkdaten ermöglicht dabei die schnelle und kostengünstige Erstellung von Bevölkerungskarten in Notfallsituationen oder bei bestehender Datenknappheit. Dieser Fortschritt in der Datennutzung bietet somit einen wertvollen Baustein zur Verbesserung von Folgenabschätzungen und zur gezielten Maßnahmenplanung in Extremsituationen.

Bengtsson et al. (2011) beschreiben diesbezüglich Ergebnisse, die auf Positionsdaten von SIM-Karten eines Mobilfunkanbieters in Haiti basieren, um Bevölkerungsbewegungen nach Katastrophen zu verfolgen und konkret das Ausmaß und die Trends von Mobilitätsbewegungen nach dem Erdbeben und der Cholera-Epidemie in Haiti im Jahr 2010 abzuschätzen. Järv et al. (2012) stützten ihre Studie ebenfalls auf Mobilfunkdaten, wobei hier lediglich die Aufzeichnungen von Handygesprächen (CDR – Call Detail Records) verwendet wurden, um das Mobilitätsverhalten abbilden zu können. Auch in der Studie von Wesolowski et al. (2013) wurde der Zusammenhang zwischen Telefonbesitz und Mobilität in Kenia anhand von Mobilfunkdaten untersucht. Hier wurde festgestellt, dass der unterschiedliche Telefonbesitz in verschiedenen Bevölkerungsgruppen zwar die Interpretation von Mobilitätsmustern erschwert, die Analyse ergab dennoch, dass die Mobilitätsschätzungen erstaunlich robust sind und nur geringfügig von den Verzerrungen durch den Telefonbesitz unterschiedlicher Nutzergruppen beeinflusst werden.

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52024DC0091> [Stand: 06.02.2025]

Lu et al. (2016) untersuchten die Auswirkungen des Klimawandels auf die Migration von Menschen in umweltbelasteten Gebieten. Dazu wurden Mobilfunkdaten von sechs Millionen Nutzern in Bangladesch analysiert. Konkret wurden anhand von Mobilfunkdaten, die während eines Zyklons im Jahr 2013 gesammelt wurden, Migrationsmuster während und nach extremen Wetterereignissen beschrieben. Die Analyse der Daten ermöglichte es, die Beziehung zwischen den grundlegenden Parametern der Migrationsmuster auf nationaler Ebene zu untersuchen.

3 FORSCHUNGSGEGENSTAND

Im Rahmen des Projektes „Flood-Activity-Risk-Monitor“ wurde eine dynamische Expositionsanalyse auf Basis von Mobilitätsanalysen angestrebt. Die Mobilitätsanalysen basierten dabei auf der Datengrundlage der technisch anonymisierten Mobilfunksignalisierungsdaten der A1 Telekom Austria, die vorverarbeitet, aufbereitet und analysiert wurden. Diese Datenbasis stellt eine repräsentative Stichprobe von über 40 % der österreichischen Bevölkerung dar. In dieser Kundenbasis sind auch virtuelle Mobilfunkmarken (MVNOs) und Roamingkunden internationaler Mobilfunkbetreiber enthalten. Die Datenerhebung erfolgt automatisch durch die aktive und passive Nutzung des Mobilfunknetzes, ohne zusätzlichen Aufwand und ohne Beeinträchtigung der Untersuchungsobjekte, wie z. B. durch Feldpräsenz, spezielle Geräte, Apps oder Software. Die Daten werden flächendeckend, zeitgleich und rund um die Uhr erhoben, was räumlich und zeitlich flexible Analysen mit gleichbleibender Qualität und damit Vergleichbarkeit ermöglicht. Da die Mobilfunkdaten eines einzelnen Anbieters nur einen Teil des Mobilfunkmarktes abdecken, werden die Daten mit den regionalen Marktanteilen in den verschiedenen soziodemografischen Gruppen des Netzbetreibers kalibriert und auf die Grundgesamtheit hochgerechnet. Internationale Besucher werden ebenfalls auf Basis regionaler Nächtigungsstatistiken entsprechend der vorherrschenden Roamingverträge hochgerechnet, um auch den Einfluss touristischer Personenbewegungen und insbesondere auch den Transitverkehr abbilden zu können. Damit wird sichergestellt, dass die Analyseergebnisse repräsentativ für die einheimische Gesamtbevölkerung und auch Personengruppen aus dem Ausland sind, auch wenn die erhobenen Daten nur einen Teil des länderspezifischen Mobilfunkmarktes abbilden.

Das Hauptziel der Analysen bestand darin, mit Hilfe von anonymisierten Mobilfunk-Signaldaten Personen zu identifizieren, die einem potentiellen Hochwasserrisiko besonders ausgesetzt sind. Die Arbeiten zielten darauf ab, Gebiete zu untersuchen, die von Hochwasserereignissen (z. B. HQ 100 oder HQ 300) besonders betroffen sind. Dabei sollte auf Basis der Analyse von Mobilfunk-Signaldaten auch der zeitliche Aspekt des menschlichen Verhaltens berücksichtigt werden, da davon auszugehen ist, dass die Anzahl der Personen in exponierten Lagen sowohl im Jahresverlauf als auch im Tagesverlauf schwanken. Bisherige Statistiken von Gemeinden oder Ländern erlauben in der Regel eine gute Abschätzung der vor Ort gemeldeten Personen (z. B. Hauptwohnsitzmeldungen) bzw. eine Abschätzung der in einem Gebiet übernachtenden Personen (über Nächtigungszahlen). Diese Statistiken sind jedoch zu statisch und können daher unter anderem den zeitlichen Aspekt der kritischen Frage nicht beantworten: Wie viele Personen halten sich zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich in einem gefährdeten Gebiet auf oder wie viele Personen nutzen eine gefährdete Verkehrsinfrastruktur während extremer Wetterereignisse?

Damit ist auch die übergeordnete Vision der bearbeiteten Fragestellungen definiert, die eine Analyse von durch Naturkatastrophen gefährdeten oder betroffenen Gebieten in nahezu Echtzeit (Near-Real-Time) verfolgt. Die Arbeiten ließen sich sinnvoll in zwei inhaltliche Komponenten gliedern.

- In einem ersten Schritt wurde die Datenvorverarbeitung und Analyse des Füllstands und der Durchfahrer pro Gebiet/Zone ermittelt. Dabei wurden im Rahmen der Analysen drei spezifische Modellregionen rund um die Flussläufe der Leitha, Ziller und des Rheingebietes definiert, um entsprechende Vulnerabilitäts- und Expositionsarten der bewegenden und stationären Bevölkerungsdichten im Sinne einer Risikokartierung aufzubereiten und deren Zeitreihen zu analysieren.
- In einem zweiten Schritt wurde das inhärente Potential einer Near-Real-Time Analyse erarbeitet, um darauf aufbauend das Risiko spezifischer Gefahrenbereiche in nahezu Echtzeit analysierbar zu machen. Hier wurde das Betrachtungsgebiet auf das Stadtgebiet von Wien gelegt, um neuralgische Stellen entlang des Wienflusses näher zu untersuchen, wobei hier aktuelle Daten des Hochwasserereignisses vom September 2024 betrachtet wurden. Unter Near-Real-Time wurde im Projekt eine minutengenaue Datenbereitstellung mit einer Verzögerung von 15 Minuten definiert.

4 DATENGRUNDLAGE UND -VORVERARBEITUNG

Aktuelle Indikatoren zur Beschreibung der Mobilität aus Erhebungen sowie deren Weiterentwicklung sind für Politik und Planung auf allen Ebenen unverzichtbar. Bisher basieren solche Indikatoren vor allem auf empirischen Primärdaten, wie sie in Mobilitätshebungen gewonnen werden. Solche Erhebungen sind sehr aufwändig, da sie nicht kontinuierlich, flächendeckend und regional differenziert durchgeführt werden können. Gleichzeitig eröffnet der Zugang zu innovativen Datenquellen wie Mobilfunkdaten neue Analyse- und Erkenntnismöglichkeiten, insbesondere im Bereich der räumlichen und zeitlichen Erfassung von Informationen, vgl. Horn et al. (2017). Datenschutz und Ethik spielen dabei eine wichtige Rolle, um sicherzustellen, dass die Daten verantwortungsvoll genutzt werden und die Privatsphäre der Menschen gewahrt bleibt. Caceres et al. (2008) haben bereits sehr früh die Vor- und Nachteile von Mobilfunkdaten für verschiedene Anwendungsfälle untersucht und bewertet. Die Arbeiten konzentrierten sich dabei auf die Auswertung von Quelle-Ziel-Beziehungen, Verkehrsströmen, Reisezeiten und -geschwindigkeiten und daraus abgeleitet auch Stauerscheinungen bzw. Verkehrsdichteanalysen auf Basis von Mobilfunk-Signalisierungsdaten. Mobilitätshebungen auf Basis von Mobilfunkdaten sind bereits seit einigen Jahren ein intensiv beforschtes und auch umgesetztes Feld, siehe Cik et al. (2017). Die verwendeten Daten werden automatisch und kontinuierlich generiert, da mobile Endgeräte ständig mit dem Mobilfunknetz verbunden sind, auch wenn sie nicht aktiv genutzt werden. Dabei wird einerseits versucht, über die technische Verbindung die aktuell am besten geeignete Basisstation zu ermitteln und andererseits dem Netz mitzuteilen, über welche Basisstation das Endgerät aktuell erreichbar ist. Da diese technischen Daten auch räumlich zuordenbar sind, eignen sie sich sehr gut für die Erstellung von Mobilfunktrajektorien und daraus ableitbaren Mobilitätsanalysen. Schlaich et al. (2010) haben bereits vor geraumer Zeit ein Verfahren vorgestellt, das durch die Analyse von Daten aus dem Mobilfunknetz raum-zeitliche Trajektorien von Reisenden generiert. Die Methode nutzt im Wesentlichen die Daten der Standortaktualisierung, die von jedem Mobiltelefon im Standby-Modus und damit passiv aufgezeichnet werden, und erfordert daher keine aktiven Handlungen wie Telefonate oder Handynutzung.

Zusammenfassend bieten innovative Datenquellen wie Mobilfunkdaten eine neuartige Möglichkeit, unser Verständnis komplexer Phänomene zu vertiefen und neue Erkenntnisse zu gewinnen, die dazu beitragen können, bessere Entscheidungen zu treffen und Problemstellungen effektiver und globaler berücksichtigen zu können. Im Folgenden wird die grundlegende Methodik der Mobilitätsanalyse auf Basis anonymisierter Mobilfunk-Signalisierungsdaten beschrieben, wobei sowohl auf die absolute Datenbasis als auch auf die Datenvorverarbeitung im Detail eingegangen wird.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Mobilitätsanalysen von Verkehrsströmen basieren auf anonymisierten, rein technischen Diagnosedaten (Mobilfunksignalisierungsdaten) des Netzbetreibers A1 Telekom Austria AG. Diese Datenbasis bildet eine repräsentative Stichprobe von ca. 40 % der österreichischen Bevölkerung (ca. 3,2 Mio. Mobilfunkgeräte) und setzt sich aus der Mobilfunkkundenbasis von A1 zusammen. Diese Kundenbasis umfasst unter anderem die Marken Bob, Yesss und Red Bull MOBILE sowie andere MVNOs (Mobile Virtual Network Operators) und Roamingkunden internationaler Mobilfunkbetreiber, die das A1 Netz in Österreich nutzen. Die Datenerhebung erfolgt automatisch durch die aktive und passive Nutzung des Mobilfunknetzes und wird für das gesamte Land gleichzeitig und rund um die Uhr erhoben. Die Methoden basieren auf modernen statistischen Algorithmen und maschinellen Lernverfahren, um aus den Millionen von gesammelten Datenpunkten, die als Rohdaten zur Verfügung stehen, Erkenntnisse über die menschliche Mobilität zu gewinnen, ohne dabei Rückschlüsse auf das Mobilitätsverhalten einzelner Personen ziehen zu können und damit auch dem Datenschutz zu entsprechen.

Bei der technischen Kommunikation mobiler Endgeräte mit dem Mobilfunknetz fallen sowohl bei aktiver Nutzung, z. B. bei Anrufen, SMS-Nachrichten oder einer aktiven Internetverbindung, als auch bei passiver Nutzung, z. B. bei der ständigen Suche nach der besten Basisstation durch das Endgerät, fortlaufend Mobilfunk-Signalisierungsdaten an. Für diese technische Kommunikation werden zu Diagnosezwecken Mobilfunk-Events erzeugt, die einen Zeitstempel besitzen und durch die Zuordnung zu einer Basisstation in gewissem Umfang georeferenziert sind. Durch die Aneinanderreihung verschiedener Mobilfunkereignisse eines Endgerätes entstehen Bewegungsdaten bzw. Mobilfunktrajektorien, aus denen sich die Tagesroutinen der mobilen Endgeräte rekonstruieren lassen. In der Regel ist ein Endgerät jedoch nicht nur mit einer, sondern mit mehreren Basisstationen gleichzeitig verbunden. Dabei werden die in einem Gebiet gleichzeitig auftretenden Ereignisse von verschiedenen Basisstationen empfangen und durch Trilateration die

Lokalisierungsgenauigkeit der Mobilfunkereignisse deutlich verbessert. Durch diesen methodischen Ansatz ist eine Orientierung an den eigentlichen Mobilfunkzellen nicht notwendig und die zu analysierenden Gebietseinteilungen, Zonierungen oder Raster können frei und sehr kleinräumig definiert werden (z. B. Geohash7-Raster mit einer Genauigkeit von rund 4.94 Bogensekunden oder umgerechnet 101.7m x 152,6m auf der Höhe von Wien).

Aus Datenschutzgründen werden die Mobilfunk-Signalisierungsdaten alle 24 Stunden zu Beginn jedes Tages nach dem Zufallsprinzip neu anonymisiert. Dadurch können Bewegungsmuster nur auf einen Tag bezogen werden.

In der Trajektorienvorverarbeitung werden in einem ersten Schritt Ausreißer aus den Datenpunkten entfernt und anschließend die (Mobilfunk-)Rohtrajektorien geglättet. Anschließend wird die Trajektorie in stationäre Aufenthalte sowie in bewegende Segmente dazwischen unterteilt. Ein stationärer Aufenthalt liegt vor, wenn ein Endgerät sich für mindestens 15 Minuten an einem anderen Standort als dem Heimatstandort aufhält, wobei hier die Definition eines stationären Aufenthalts je nach Anwendungsfall unterschiedlich und flexibel gestaltet werden kann. Für die stationären Aufenthalte werden neben der geografischen Verortung auch die Anfangs-, Endzeit und Dauer des Aufenthalts ermittelt. Auf Basis der stationären Aufenthalte pro Tag lässt sich auf die bewegenden Segmente dazwischen schließen. Für die bewegenden Segmente werden neben der geografischen Verortung der Trajektorie auch die Abfahrts- und Ankunftszeit, die Reisezeit, die Reisedistanz (Fahrtweite) und die Durchschnittsgeschwindigkeit der Reise ermittelt. Die durchschnittliche Anzahl der Wege pro Person und Tag bildet hier auch einen elementaren Kennwert, welcher bei der Validierung der Ergebnisse der Gesamtpersonenfrequenzen herangezogen wird.

Nach der Segmentierung wird für jedes Endgerät ein Heimatstandort (Wegezweck Wohnen) ermittelt. Dieser Heimatstandort ist definiert als der erste Standort, an dem sich das Endgerät nach der Re-anonymisierung im Zeitraum zwischen 02:30 Uhr und 05:30 Uhr für mindestens 30 Minuten aufhält. Liegt in diesem Zeitfenster kein Aufenthalt vor, wird der Standort der ersten Beobachtung nach der Re-anonymisierung verwendet.

Da die Mobilfunkdaten aus dem Netz der A1 Telekom Austria nur einen Teil des Mobilfunkmarktes abdecken, werden die Daten mit den regionalen Marktanteilsverhältnissen in den verschiedenen soziodemographischen Gruppen des Netzbetreibers kalibriert und auf die Grundgesamtheit hochgerechnet. Damit wird sichergestellt, dass die Analyseergebnisse repräsentativ für die Gesamtbevölkerung sind, auch wenn die erhobenen Daten nur einen Teil des Mobilfunkmarktes abbilden. Die Kalibrierung ermöglicht eine genaue Schätzung und Hochrechnung der Mobilitätsmuster auf die Gesamtbevölkerung. Die auf diese Weise ermittelten Wohnstandorte stimmen nach Hochrechnung auf die Grundgesamtheit sehr gut mit den Erwartungswerten überein, die sich aus einer Kombination der Zahlen des amtlichen Melderegisters bzw. der Übernachtungsstatistik und z. B. der Krankenhausbettenbelegung ergeben.

Ein entscheidender Schritt der Vorverarbeitung der Mobilfunktrajektorien stellt eine belastbare Bestimmung der stationären und bewegenden Segmente dar, um hier Signalsprünge und Messungenauigkeiten von den tatsächlich stattfindenden Bewegungen zu detektieren und zu trennen. Sowohl die stationären als auch die bewegende Segmente können dann je nach Anwendungsfall einer Zelleneinteilung wie z. B. sehr kleinen Rasterelementen zugeordnet werden und ergeben schließlich Heat Maps der stationären bzw. bewegende Segmente, siehe Fig. 1. Schließlich besteht über Map-Matching-Verfahren prinzipiell die Möglichkeit, kantenbasierte Routenverläufe aus den Mobilfunkbewegungsdaten zu extrahieren und hierfür auch eine Verkehrsmittelerkennung durchzuführen, um die Datensätze mit zusätzlichen Informationen anzureichern.

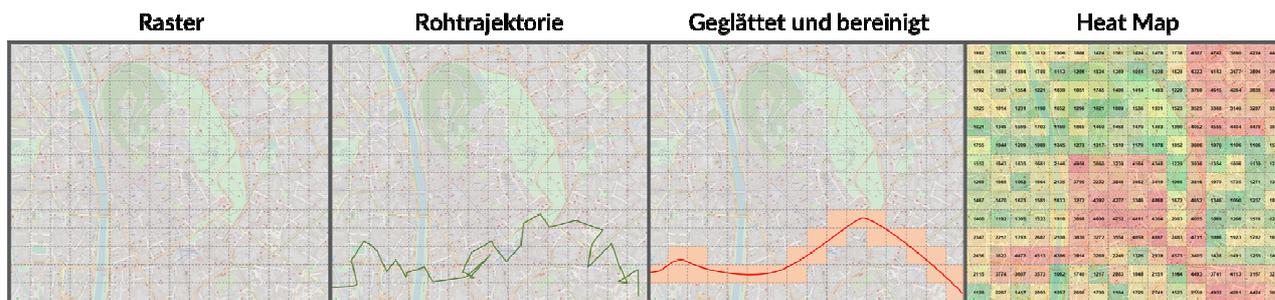


Fig. 1: Zuordnung von geglätteten und bereinigten Trajektorien zu Rasterdaten bewegender Segmente

Die aus den Analysen resultierenden Verkehrskennziffern werden anhand von Referenzwerten aus dem Mobilitätsbereich, wie z. B. Ergebnissen lokaler Verkehrserhebungen (mittlere Anzahl der Wege pro Tag und Person), Fahrgastzahlen oder Belastungszahlen aus Verkehrsdetektoren, validiert. Bei der Validierung ist zu beachten, dass durch die wesentlich feinere räumliche und zeitliche Granularität der Analysen auf Basis von Mobilfunkdaten ortsspezifische sowie zeit-, tages-, wochen- oder saisonabhängige Besonderheiten sichtbar werden, die bei einer größeren räumlichen oder zeitlichen Aggregation nicht erkennbar wären. Ein Qualitätsmonitoring der Mobilfunkrohdaten läuft automatisch im Hintergrund und warnt bei starken, unplausiblen Abweichungen in Anzahl und Auftreten von regionsspezifischen Mobilfunkereignissen und Mobilfunktrajektorien und gibt tagesgenau einen entsprechenden Qualitätsindex regionalspezifisch aus. Dieses Tool stellt sicher, dass nur validierte und plausibilisierte Datensätze in die Mobilfunkanalysen einfließen und keine Artefakte durch Mastausfälle auf Seiten der physikalischen Infrastruktur oder Datenausfälle im Datenstream selbst die Analyseergebnisse beeinflussen.

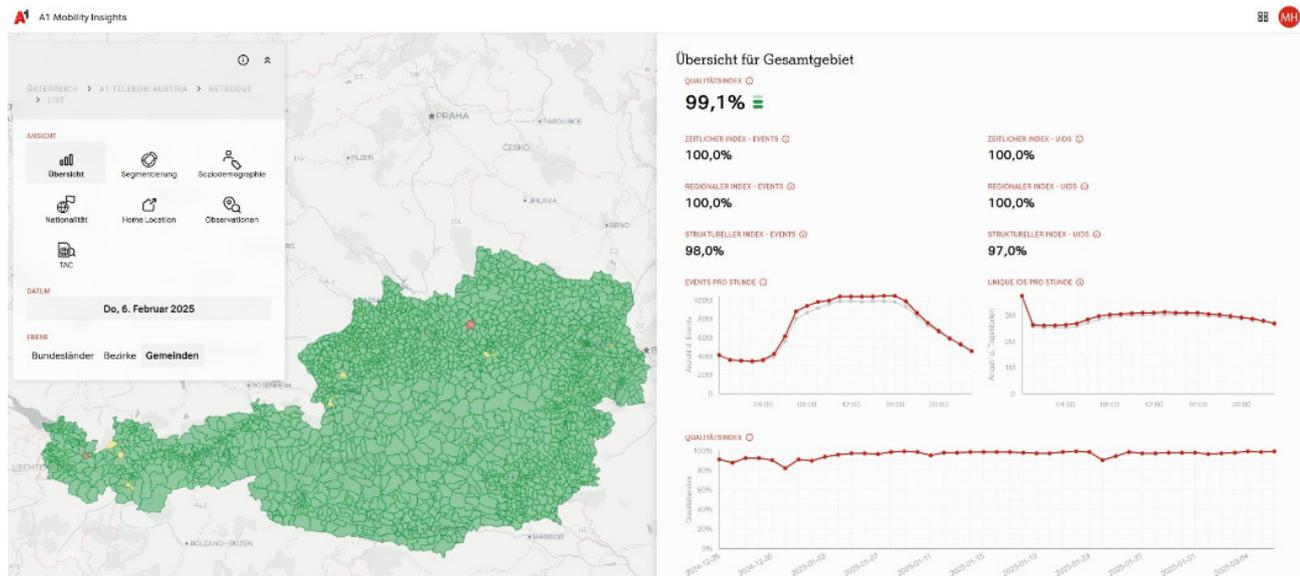


Fig. 2: Data Quality Monitoring System der Mobilfunksignaldaten

5 METHODIK UND ANALYSEERGEBNISSE

Im Rahmen des Projektes „Flood-Activity-Risk-Monitor FARM“ wurde eine dynamische Expositionsanalyse auf Basis von Mobilitätsanalysen durchgeführt, wobei die Mobilitätsanalysen auf der Verarbeitung und Aufbereitung anonymisierter Mobilfunkdaten basierten. Die Projektarbeiten wurden zweckmäßigerweise in drei Teile gegliedert, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

5.1 Vorverarbeitung und Aufbereitung der Mobilfunk-Rohdaten

In einem ersten Schritt wurden die zu untersuchenden neuralgischen Überflutungsflächen festgelegt. Neben den Überflutungsflächen entlang des Rheins wurden auch Flächen der Ziller und Leitha räumlich festgelegt. Hierfür wurden jeweils zwei volle Kalenderwochen im Jahr 2023 (17.4-23.4.2023 bzw. 19.6-25.6.2023) als Analysezeitraum definiert. Für diese raum-zeitliche Einteilung wurden die anonymisierten Mobilfunkdaten erhoben und für die nachfolgenden Mobilitätsanalysen softwaretechnisch vorverarbeitet. Dabei wurde eine möglichst kleinräumige räumliche Auflösung auf Basis eines 500x500m Rasters gewählt und mit den Überflutungsflächen verschnitten, für die die Datenbereitstellung von stationären und mobilen Entitäten festgelegt wurde.

Die Signalisierungsinformationen von ca. 10.000 Mobilfunkstationen des A1-Netzes mit einer zugrunde liegenden Kundenbasis von mehr als 3,2 Mio. Mobilfunkkunden wurden im Invenium-Rechencluster gesammelt. Die Mobilfunk-Rohdaten wurden für die räumlichen Untersuchungsgebiete und die vereinbarten Zeiträume vorverarbeitet und regionsspezifisch hochgerechnet. Durch Triangulationsmodelle wurden die Positionsgenauigkeiten verbessert und mit intelligenten KI-Algorithmen (Mapmatching, Machine Learning, Clusteranalyse) Bewegungsverläufe und -profile erstellt, die die Grundlage für die weiteren Analysen der stationären und bewegenden Segmente bildeten.

5.2 Analyse des Füllstandes und Durchfahrer pro Zelle

In einem zweiten Schritt wurden die in den Untersuchungsgebieten erhobenen anonymisierten Mobilfunkdaten für die entsprechenden Analysezeiträume in stationäre und bewegende Segmente segmentiert. Auf Basis der segmentierten Trajektorien wurden für jede Rasterzelle der Füllstand Auslastung (stationäre Segmente) sowie die Durchfahrer (bewegende Segmente) in den einzelnen Rasterzellen stundenscharf für den gesamten Zeitraum über die zwei Analysewochen im Jahr 2024 berechnet und entsprechende Heat Maps aufbereitet. Fig. 3 zeigt hier die Analyse des Füllstands (linke Seite) und der Durchfahrer (rechte Seite) im Zusammenhang mit den Überflutungsflächen des Rheingebietes für die Morgenspitze im Zeitraum von 7 bis 8 Uhr für einen ausgesuchten Tag (19.4.2024). Hierbei wurden die 500m Raster mit den Überflutungsflächen des Rheins verschnitten und die Rasterelemente gezielt analysiert. Für die Durchfahrer wurden die gesamten Trajektorien mit Schnittstellen in das Überflutungsgebiet berücksichtigt, weswegen hier auch ein größeres Gebiet durch die Rasterelemente im Zuge der Analysen abgedeckt ist, als vergleichsweise für die stationären Füllstandanalysen. Während die höchsten Rasterzellwerte der stationären Segmente im Bereich der Stadt Lustenau erkennbar werden, verzeichnen die Rasterzellen im Bereich Götzis und Hohenems sehr hohe Rasterzellwerte der bewegenden Segmente, welche die Durchfahrer in diesem Bereich repräsentieren.

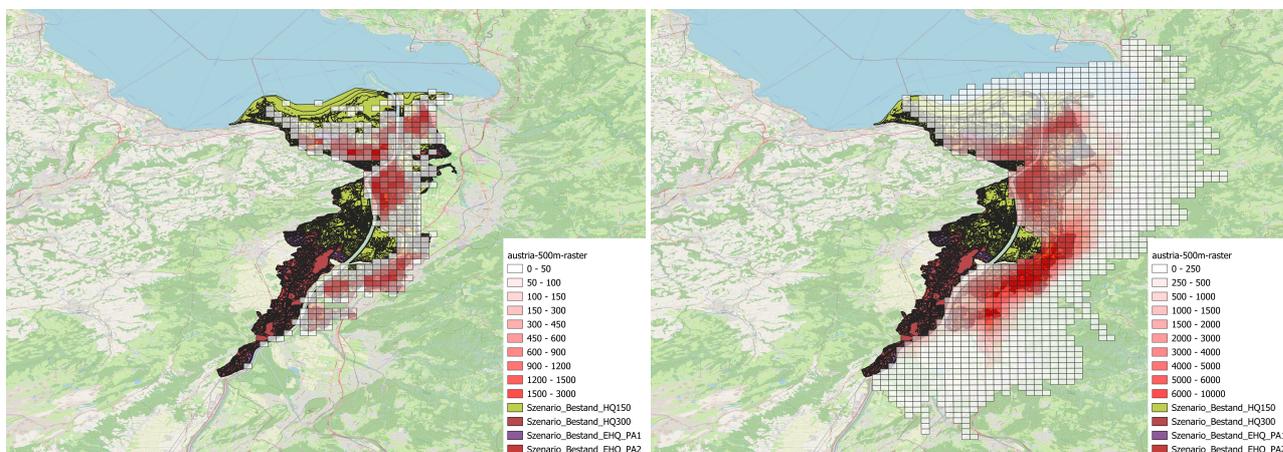


Fig. 3: 500x500m Raster für die Überflutungsfläche des Rheingebiets zur Analyse des Füllstands (links) und der Durchfahrer (rechts)

Im Hinblick auf eine dynamische Expositionsanalyse können auf Basis der stundenfeinen Füllstände und Durchfahrer, die risikoreichsten Zeiträume auf Basis der maximalen Anzahl gefährdeter Personen ermittelt und weitere Kennzahlen abgeleitet werden. Die Ergebnisse zeigen hier, dass die Anzahl der gefährdeten Personen sowohl pro betrachtetem Wochentag als auch pro betrachteter Tageszeit für die drei Untersuchungsräume des Rheintals, entlang der Ziller und der Leitha unterschiedlich sein kann. Durch die Verschneidung der vorliegenden Überflutungszonen mit den stationären und bewegenden Mobilfunkdaten ergibt sich hier eine gute Abbildung des Gefährdungspotentials. Weitere Entwicklungen hinzu einem Gefährdungs-Score, welcher sowohl die Anzahl der gefährdeten Personen als auch die unterschiedlichen Überflutungszonen (z. B. HQ100 vs. HQ300) miteinbezieht sind hier in weiterer Folge zu entwickeln.

Anhand der Verkehrsstärke der Durchreisenden können die Einflüsse auf die bestehende Verkehrsinfrastruktur betrachtet werden, die aufgrund ihrer Exposition gegenüber verschiedenen Naturereignissen wie Hochwasser, aber auch Lawinenverschüttungen einem erhöhten Ausfallsrisikopotenzial ausgesetzt sind. Dabei sollten insbesondere jene Verkehrsinfrastrukturen betrachtet werden, die für eine Region unverzichtbar sind. Als Beispiel sei die einzige Zufahrtsstraße zu einer Ortschaft in einem Tal genannt, deren Unpassierbarkeit die Ortschaft von der Außenwelt abschneiden würde. Unter Verkehrsstärke wird die Anzahl der Personen pro Stunde verstanden, die sich auf dem betrachteten Abschnitt der Verkehrsinfrastruktur bewegen und die aus den Rasterergebnissen der Mobilfunkdaten abgeleitet werden kann.

5.3 Analyse in Near-Real-Time

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass selbst aufwändige Hochwasserschutzbauten bei Extremereignissen keine absolute Sicherheit bieten können. Diese Erkenntnis der Verletzlichkeit durch Naturkatastrophen hat für viele Menschen das Thema Naturgefahren stärker ins Bewusstsein gerückt. Darauf

aufbauend wurden die Eckpfeiler für ein integrales Hochwasserrisikomanagement in Österreich und auf EU-Ebene erarbeitet und schrittweise mittels der EU-Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG)² umgesetzt.

Vom 12. bis 20. September 2024 ereignete sich ein massives Hochwasserereignis infolge einer sogenannten Vb-Wetterlage in Österreich. Vb (sprich: Fünf-B) bezeichnet dabei die Zugbahn eines Tiefdruckgebietes, das vom Atlantik kommend über das westliche Mittelmeer zieht und dann nach Norden abdreht. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt deutlich, dass ähnliche Wetterlagen, wie sie zum Hochwasser im September 2024 geführt haben, in Mitteleuropa immer wieder zu außergewöhnlichen Niederschlagsmengen und Hochwasserereignissen geführt haben, wie beispielsweise auch im August 2002 und im Juni 2013. Je nach Zugrichtung und Ausdehnung der Niederschlagsgebiete bei diesen Vb-Wetterlagen und je nachdem, wo sie eventuell länger stationär bleiben, können der südliche Alpenrand oder die nördlichen Staulagen der Alpen, aber auch die Staulagen der mitteleuropäischen Mittelgebirge in den Nachbarländern betroffen sein.

Zur Veränderung von großräumigen Starkniederschlägen im Klimawandel liegen bereits umfangreiche Studien wie WETRAX und darauf aufbauend WETRAX+ vor, an denen Meteorologen und Hydrologen gemeinsam gearbeitet haben, vgl. Hofstätter et al. (2015). Im Projekt WETRAX wurde insbesondere die Veränderung großräumiger Starkniederschläge im Zuge des Klimawandels für den Zeitraum 1951 bis 2100 untersucht. Diese Niederschläge haben das Potenzial zu großräumigen, extremen Flusshochwassern zu führen, wie z. B. im August 2002 oder im Mai 2013 an Donau und Elbe. Das Untersuchungsgebiet dieser Studien umfasste Süddeutschland, Österreich und angrenzende Teile der Schweiz sowie Tschechien. Als innovativer Ansatz wurden die für Starkniederschläge relevanten atmosphärischen Zirkulationsmuster mit zwei verschiedenen Verfahren bestimmt und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass viele großräumige Starkniederschlagsereignisse in Mitteleuropa mit nur wenigen Zugbahnen und Zirkulationstypen („Wetterlagen“) erklärt werden können. Das wichtigste Muster ist ein persistentes Höhentief über dem Alpenraum in Verbindung mit einem Bodentief, das von Oberitalien nach Polen zieht. Die Ergebnisse können dazu beitragen, hochwasserrelevante atmosphärische Prozesse besser zu verstehen und Entscheidungsträger im Hochwassermanagement bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel mit belastbaren Fakten zu unterstützen. So groß die Schäden und so tragisch die Auswirkungen solcher Extremereignisse sind, so wichtig ist eine genaue Analyse der Ereignisse. Sie hilft, die natürlichen Prozesse besser zu verstehen und Schlussfolgerungen für geeignete Maßnahmen zu ziehen.

Niederschlagssumme 12.09.2024-16.09.2024

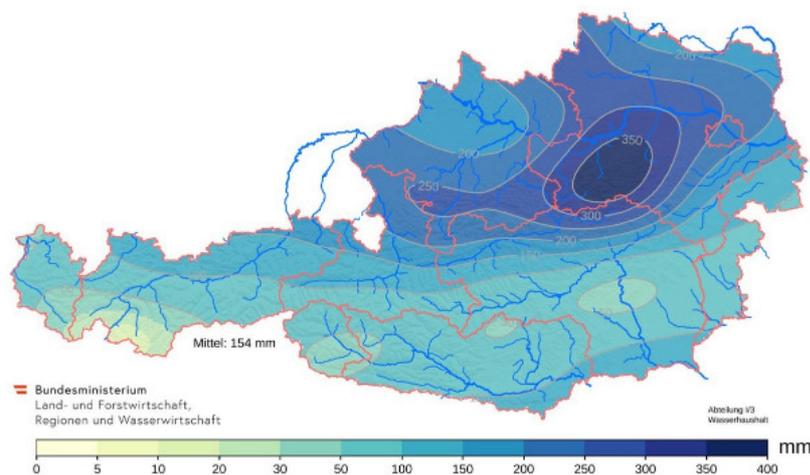


Fig. 4: Niederschlagssummen in Österreich zwischen dem 12.09.2024 und 16.09.2024 (Datengrundlage: Hydrographie Österreich)³

Im Zuge des Hochwasserereignisses vom 12. bis 20. September 2024 wurden in einem Gebiet zwischen Mostviertel und Wienerwald Rekordmengen von 300 bis über 400 mm in 5 Tagen (12.9.2024 – 16.9.2024) registriert (Fig. 4). Dort fiel in 5 Tagen mehr als das 5,5-fache der langjährigen mittleren Monatssumme eines Septembers. In den Flussgebieten unterhalb von 1.000 bis 1.200 m Seehöhe führten die intensiven und lang anhaltenden Niederschläge zu einer raschen Sättigung der Böden, sodass ein Großteil der Niederschläge

² https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/richtlinie_management_hochwasser_risiken.pdf [Stand: 06.02.2025]

³ <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/hydrographie/chronik-besonderer-ereignisse/hochwasser-september-2024.html> [Stand: 06.02.2025]

sehr rasch abflusswirksam wurde. Dies führte vor allem in den Schwerpunktgebieten in Niederösterreich und Wien zu markanten Anstiegen der Wasserführungen und Ausuferungen der Fließgewässer (siehe Fig. 5). Auch viele landwirtschaftlich genutzte Flächen standen unter Wasser, da das Niederschlagswasser aufgrund der hohen Niederschlagsintensität und der Sättigung der Böden nicht mehr versickern konnte. In weiterer Folge führten Dammbüche zu zusätzlichen Überschwemmungen. So wurden in Niederösterreich in weiten Teilen des Bundeslandes 30- bis 100-jährliche Ereignisse beobachtet. An vielen Gewässern traten extreme Hochwasserspitzen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten von deutlich mehr als 100 Jahren auf, wobei die bisher gemessenen Höchstwerte vielfach überschritten wurden. Am Pegel Zwettl-Bahnbrücke am Kamp wurde erneut ein mehr als 100-jährliches Hochwasserereignis registriert, die Durchflussmenge blieb jedoch unter den Höchstwerten von 2002. Die damaligen Hochwasserscheitel hatten eine Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in 1.000 bis 1.500 Jahren am 7. August 2002 und von 500 Jahren am 13. August 2002. Extreme und deutlich über einem 100-jährlichen Ereignis liegende Werte wurden auch in Wien an der Liesing und insbesondere am Wienfluss registriert.

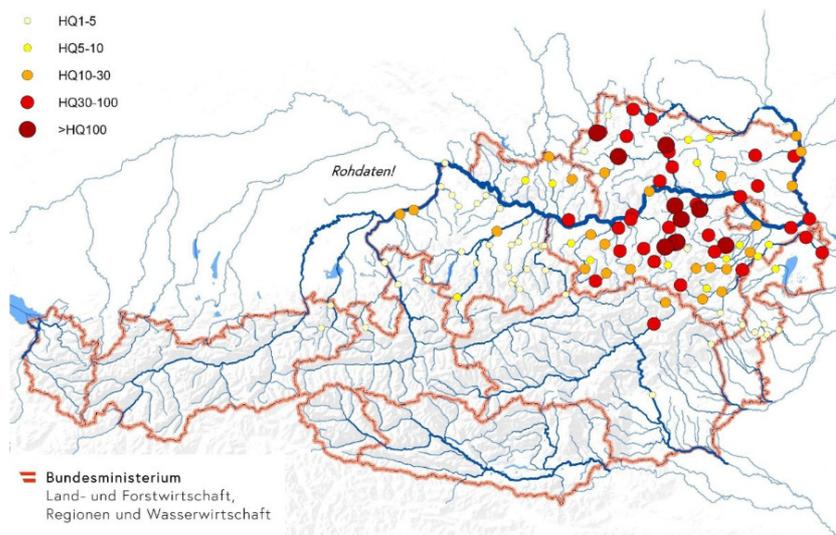


Fig. 5: Maximale erreichte Jährlichkeiten der Hochwasserscheitel an ausgesuchten Pegeln im Zeitraum 14.09.2024 bis 20.09.2024 (Datengrundlage: Hydrographie Österreich)⁴

Der innerstädtische Bereich rund um den Wienfluss wurde hier auch als prototypischer Anwendungsfall für die Near-Real-Time Analyse gewählt, um die Personendichte im Zuge des Hochwasserereignisses des September 2024 analysieren zu können.

Im Zuge der Erweiterung des Mobilfunk-Datenstreams konnten so Analysen für eine Near-Real-Time Anwendung mit einem Zeitverzug von 15 Minuten erarbeitet werden. Mit der Weiterentwicklung hin zu einer Near-Real-Time Anwendung können die bislang tagesaktuellen, stündlichen Expositionsdaten noch schneller und zeitnäher aufbereitet werden. Near-Real-Time ermöglicht es, das Personenaufkommen an bestimmten Standorten und kritischen Infrastrukturen (Brücken, Staudämme, etc.) mit nur wenigen Minuten Verzögerung zu beobachten und zu analysieren. Nahezu in Echtzeit kann so die Frage beantwortet werden, wie viele Besucher sich gerade an einem kritischen Ort aufhalten und im Notfall, z. B. im Zuge eines Hochwasserereignisses, kann auf dieser Datengrundlage zeitnah reagiert und entsprechende, zielgerichtete und sicherheitsrelevante Maßnahmen ergriffen werden. Diese Entwicklungen begünstigen zudem auch eine zeitgerechtere Trendbestimmung des Personenaufkommens, fundiertere Entscheidungsfindung in Ausnahmesituationen und ein nachhaltigeres Ressourcen- und Risikomanagement.

Fig. 6 zeigt das Real-Time Dashboard. Hier wurden die Personendichten in einem 150x150m Raster im Bereich des Wienflusses auf Höhe des Donaukanals in Near-Real-Time analysiert. Dieser Bereich war neben mehreren anderen Stellen in Wien entlang des Wienflusses akut vom Hochwasserereignis im September 2024 betroffen. Die ausgewählte Rasterzelle umfasst hier den Bereich der Aspernbrücke und weist eine Personenanzahl von 3.630 Personen (bereits auf Zehnerstellen gerundet) auf. Die Anzahl der Personen kann auch als Ganglinie über die letzten 24 Stunden aufgetragen werden. Dabei ist zu beachten, dass im

⁴ <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/hydrographie/chronik-besonderer-ereignisse/hochwasser-september-2024.html> [Stand: 06.02.2025]

Zeitbereich zwischen 0 Uhr und 4 Uhr morgens täglich eine Neu-anonymisierung der Handy-IDs erfolgt. Hier sinkt die Ganglinie kurzfristig auf den Wert 0. Aus Anonymisierungsgründen werden Rasterzellen mit weniger als 20 Personen nicht weiter spezifiziert und hier nur der Wert <20 für die jeweilige Rasterzelle ausgegeben. Die hier dargestellten Raster entsprechen einer Kantenlänge von 150m. Je nach Anwendungsfall ist auch eine Rasterdarstellung von 300x300m oder eine bezirksfeine Gebietseinteilung möglich.

Neben der Ausgabe der Personendichte existiert im Hintergrund für jede Rasterzelle auch ein historischer Datensatz. Mit Hilfe von Differenzberechnungen können diese historischen Mittelwerte der Rasterzellen mit der aktuellen Personendichte derselben Rasterzelle verglichen und darauf aufbauend bei Überschreitung bestimmter Schwellwerte eine Anomaliedetektion durchgeführt werden. Diese Anomaliedetektionen bieten ein hohes Potential in Zeiten extremer Wetterlagen bei der Beobachtung von zu evakuierenden Gebieten und können gezielt in die akute Maßnahmen- und Einsatzplanung einfließen.

Neben der hochgerechneten absoluten Anzahl der Personen in diesen einzelnen Rasterelementen können auch soziodemografische Datensätze einbezogen werden, die aus den Vertragsdaten der Mobilfunkdaten hochgerechnet werden. Die Hochrechnung erfolgt regional nach dem Wohnort der einzelnen Entitäten. Die soziodemografischen Informationen der Personen umfassen dabei neben der Altersstruktur auch das Geschlecht der Personen. Aus den Informationen der Roamingkunden lassen sich auch die Herkunftsländer klassifizieren und werden mit ausgegeben. Aus Anonymisierungsgründen wird auch hier die Anzahl der Personen immer auf die Zehnerstelle gerundet.



Fig. 6: Analyse der Personendichte in Near-Real-Time in 150x150m-Raster im Bereich Aspernbrücke (Donaukanal/Wienfluss).

Die neuen Near-Realtime-Analysen stellen einen Meilenstein in der Etablierung einer dynamischen Expositionsanalyse für die akute Betrachtung von Personenansammlungen in neuralgischen Zonen im Zuge von Extremwetterereignissen dar. Darauf aufbauend können in weiterer Folge entsprechende Vulnerabilitäts- und Expositionsarten der mobilen und stationären Bevölkerungsdichten im Sinne einer Risikokartierung dynamisch und ständig aktuell ohne lange Latenzzeiten erstellt werden. Darüber hinaus bieten die Analysen auch die Möglichkeit einer historischen Zeitreihenanalyse der Bevölkerungsdichten. Ob hier die Auflösung eines 150m Rasters eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet, muss in weiterer Folge für unterschiedliche Gebiete mit unterschiedlichen Geländedynamiken und Bebauungsdichten evaluiert werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Gerade die Hochwasserereignisse im September 2024 haben die Notwendigkeit einer dynamischen Expositionsanalyse gezeigt. Mit den in Near-Real-Time verfügbaren Mobilfunkdaten steht dafür eine panoptische, passive Datenquelle zur Verfügung, die die notwendige räumlich-zeitliche Detailschärfe und eine permanente Verfügbarkeit für ganz Österreich aufweist. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen und Weiterentwicklungen im Bereich der Near-Real-Time Analysen von Personendichten konnten mit der

passiven Datenquelle der Mobilfunksignalisierungsdaten wichtige Lücken in der Aufbereitung von dynamischen Expositionsanalysen geschlossen werden. Durch die österreichweite, lückenlose Verfügbarkeit von Mobilfunkdaten ist auch ein flächendeckender Rollout und eine kontinuierliche Auswertung von Personendichten in Near-Real-Time für das gesamte Bundesgebiet Österreichs einfach realisierbar.

Die vorgestellte Methodik basiert auf den täglich verfügbaren Mobilfunksignalen, die nun auch in Near-Real-Time mit einer Zeitverzögerung von 15 Minuten analysiert werden können. Die Ausführungen beziehen sich ausnahmslos auf den Anwendungsfall der Hochwasserrisikoanalyse, die hier sehr kleinräumig auf Rasterbasis mit Zellgrößen von 500x500m bzw. 150x150m durchgeführt wurden. Neben dem Anwendungsfall der Analyse von Extremwetter- und Hochwasserereignissen sind zahlreiche weitere Anwendungsfelder denkbar, die durch eine kleinräumige und zeitnahe Analyse von Personendichten und Bewegungsströmen besser analysierbar werden. Diese Anwendungsfelder können von der Personenlenkung bei Großveranstaltungen bis hin zur Planung von Sofortmaßnahmen bei terroristischen Anschlägen reichen.

7 REFERENCES

- BENGTSSON, L., Lu, X., Thorson, A., Garfield, R., von Schreeb, J.: Improved response to disasters and outbreaks by tracking population movements with mobile phone network data: A post-earthquake geospatial study in Haiti. *PLoS Med* 8(8): e1001083, 2011.
- BIRKMANN, J., Garschagen, M., Kraas, F., Quang, N.: Adaptive Urban Governance: New Challenges for the Second Generation of Urban Adaptation Strategies to Climate Change. *Sustainability Science*, 5, 185-206, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11625-010-0111-3>
- BIRKMANN, J., Garschagen, M., Tuan, V.V., Binh, N.T.: Vulnerability, Coping and Adaptation to Water Related Hazards in the Vietnamese Mekong Delta. In: Renaud, F. and Kuenzer, C. "The Mekong Delta System: Interdisciplinary Analyses of a River Delta." *The Mekong Delta System*, 2012.
- CACERES, N., J. Wideberg, and F. G. Benitez: Review of Traffic Data Estimations Extracted from Cellular Networks. *IET Intelligent Transport Systems* 2 (3), 179–192, 2008.
- CIK, M., Horn, C., Fellendorf, M.: Floating-Phone-Data für die Berechnung von verkehrsmittelspezifischen Nachfragematrizen. In *Heureka17* (pp. 327-337), 2017. Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen eV.
- DEVILLE, P., Linard, C., Martin, S., Gilbert, M., Stevens, F.R., Gaughan, A.E., Blondel, V.D., Tatem, A.J.: Dynamic population mapping using mobile phone data, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 111 (45) 15888-15893, 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1408439111>
- DUJARDIN, S., Jacques, D., Steele, J. & Linard, C.: Mobile Phone Data for Urban Climate Change Adaptation: Reviewing Applications, Opportunities and Key Challenges. In: *Sustainability*, vol. 12, no. 4, 1501. Namur, 2020.
- HOFSTÄTTER, M., Jacobeit, J., Homann, M., Lexer, A., Chimani, B., Philipp, A., Beck, C., Ganekind M.: WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. *Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa. Projektendbericht. Geographica Augustana* 19, 2015. ISBN: 3-923273-96-6; ISSN: 1862-8680;
- HORN, C., Gursch, H., Kern, R., Cik, M.: QZTool – Automatically Generated Origin-Destination Matrices from Cell Phone Trajectories. in: Stanton, N.A., Landry, S., Di Bucchianico, G., Vallicelli, A. (Eds.), *Advances in Human Aspects of Transportation, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 823–833, 2017.
- JÄRV, O., Ahas, R., Saluveer, E., Derudder, B., Witlox, F.: Mobile phones in traffic flow: A geographical perspective to evening rush hour traffic analysis using call detail records. *PLoS One* 7(11): e49171, 2012.
- LU, X., Wrathall, D.J., Sundsøy, P.R., Nadiruzzaman, M., Wetter, E., Iqbal, A., Qureshi, T., Tatem, A., Canright, G., Engø-Monsen, K., Bengtsson, L.: Unveiling hidden migration and mobility patterns in climate stressed regions: A longitudinal study of six million anonymous mobile phone users in Bangladesh. *Global Environmental Change*, Volume 38, 2016, Pages 1-7, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.002>
- MATEOS, P., Fisher, P.F.: Spatiotemporal accuracy in mobile phone location: assessing the new cellular geography. in Drummond, J., Billen, R., Forrest, D. and João, E. (ed.) *Dynamic & Mobile GIS: Investigating Change in Space and Time*. London: Taylor & Francis CRC, 189-212, 2007.
- RATTI, C., Pulselli, R.M., Williams, S., Frenchman, D.: Mobile landscapes: Using location data from cell phones for urban analysis. *Environ Plann B Plann Des* 33(5):727–748, 2006.
- PULSELLI, R., Ramono, P., Ratti, C., Tiezzi, E.: Computing urban mobile landscapes through monitoring population density based on cellphone chatting. *Int J Des NatEcodynamics* 3(2):121–134, 2008.
- SCHLAICH, J., Otterstatter, T., Friedrich, M.: Generating Trajectories from Mobile Phone Data. Presented at the Transportation Research Board 89th Annual Meeting/Transportation Research Board, 2010.
- TATEM A., Linard C.: Population mapping of poor countries. *Nature* 474(7349):36–36, 2011.
- WESOLOWSKI, A., Eagle, N., Noor, A.M., Snow, R.W., Buckee, C.O. (2013) The impact of biases in mobile phone ownership on estimates of human mobility. *J R Soc Interface* 10(81): 20120986.