

Urbane hydrologische Modellierung – vom kleinen zum großen Maßstab

Gerald Krebs^{1,2}, Teemu Kokkonen² und Harri Koivusalo²

¹Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz

²Department of Built Environment, School of Engineering, Aalto University

Kurzfassung: Um den Auswirkungen zunehmender Urbanisierung auf den Wasserhaushalt entgegen zu wirken, stehen eine Reihe von dezentralen, naturnahen Maßnahmen (NWB) zur Verfügung, deren positive Wirkung allgemein anerkannt ist. Hydrologische Modellierung ist eine Möglichkeit, die Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen vor dem Bau abzuschätzen. Eine Abschätzung auf Stadtgebietsebene, die für eine ganzheitliche Regenwasserbewirtschaftungsstrategie vorteilhaft wäre, wird allerdings in den meisten Fällen durch mangelnde Verfügbarkeit von räumlichen und hydrometeorologischen Daten erschwert. In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Erstellung von hydrologischen Modellen vorgestellt, die auf große urbane Gebiete anwendbar ist und gleichzeitig, durch eine hohe räumliche Auflösung, die Abbildung und Modellierung von NWBs erlaubt. Die Methodik basiert auf einem reduzierten Entwässerungsnetzwerk, regionalisierten Modellparametern, und einer automatisierten Einzugsgebietseinteilung unter Verwendung eines Digitalen Geländemodelles (DGM). Die Untersuchungen zeigen, dass regionalisierte Modellparameter in einem Modell, das nur Kanalrohre mit einem Durchmesser von min. 300mm verwendet und auf einem DGM basiert, die zeitliche Dynamik urbanen Regenwasserabflusses hinreichend wiedergeben kann.

Keywords: Hydrologische Modellierung, Skalierung, SWMM, räumliche Auflösung

1 Einleitung

Urbanisierung gilt als eine der größten Herausforderungen der heutigen Gesellschaft. Während im Jahr 2000 71 % der europäischen Bevölkerung in Städten lebten, wird dieser Anteil auf 78 % im Jahr 2030 wachsen. Ein ähnlicher Trend zeichnet sich auch in Finnland ab, wo der Anteil der Stadtbevölkerung im Jahr 2030 auf 86 % geschätzt wird, im Vergleich zu 82 %

im Jahr 2000 (United Nations, 2012). Der Verbau von vormals natürlichen Flächen mit Straßen, Häusern, und Parkplätzen, führt zu einer steigenden Versiegelung, die sich negativ auf den Wasserhalt auswirkt. Diese Auswirkungen zeigen sich als erhöhter Oberflächenabfluss (Arnold Jr und Gibbons, 1996; Shuster et al., 2005; Valtanen et al., 2014), größere Abflussspitzen (Shuster et al., 2005; Sillanpää und Koivusalo, 2015) und eine generelle Häufung von Abflussereignissen (Marsalek et al., 2007; Valtanen et al., 2014). Schadstoffe lagern sich auf versiegelten Flächen ab die dann, bei Regenereignissen, ohne ausreichende Filterung den Vorfluter erreichen und zu einer erhöhten Belastung der Oberflächengewässer führen (Ruth, 2003; Schueler et al., 2009). Versiegelung führt außerdem zu einer reduzierten Versickerung und einer Verringerung des Trockenwetterabflusses (Haase, 2009). Die verursachte Verringerung der Grundwasseranreicherung kann in einzelnen Gebieten zu Problemen in der Trinkwasserversorgung führen.

Naturnahe Niederschlagswasserbewirtschaftungsmaßnahmen (NWB) sind eine Möglichkeit die nachteiligen Auswirkungen zunehmender Urbanisierung abzuschwächen. Diese Maßnahmen nutzen natürliche hydrologische Prozesse wie Versickerung, Verdunstung und Speicherung. Neben ingenieurtechnischen Maßnahmen wie Gründächern oder dezentralen Versickerungsanlagen zählen auch die Vermeidung von Versiegelung und der Erhalt von urbanen Grünflächen zu den NWBs (US EPA, 2000). Hydrologische Modelle sind eine Möglichkeit, die Auswirkung von NWBs auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Die meisten NWBs sind durch kleinräumige hydrologische Prozesse charakterisiert, die eine räumlich hochauflösende, detaillierte Modellierungsstrategie erfordern (Amaguchi et al., 2012). Eine solche Strategie setzt die Verfügbarkeit von (i) detaillierten Daten zur Oberfläche und zum Entwässerungsnetz und (ii) hydrometeorologischen Daten mit hoher zeitlicher Auflösung voraus. Allerdings sind solche Daten für große Einzugsgebiete oft nicht verfügbar (Gironás et al., 2010). Daher muss eine detaillierte Oberflächenbeschreibung oft arbeitsintensiv von Luftbildern abgeleitet und Kanaldaten (z. B. Durchmesser) händisch ergänzt werden. Und obwohl Niederschlagsdaten zunehmend vorhanden sind, fehlen Abflussmessungen meist. Bei der Betrachtung kleiner Einzugsgebiete können die erforderlichen Daten erhoben werden. Wenn die Wirkungsweise von NWBs allerdings auf Einzugsgebiets- bzw.

Stadtebene betrachtet werden soll, ist eine Datenerhebung zeitlich selten durchführbar und andere Herangehensweisen erforderlich.

Die Übertragung von hochauflösenden Modellen, die für Kleineinzugsgebiete kalibriert wurden, bietet eine Alternative, den Wasserkreislauf großer urbaner Einzugsgebiete zu simulieren. Diese Herangehensweise erlaubt die Modellerstellung für große Einzugsgebiete auch bei schlechter Datenverfügbarkeit und basiert auf verschiedenen Methoden die in diesem Beitrag zusammengefasst sind.

2 Untersuchungsgebiet

Drei Kleineinzugsgebiete (EG 1-3) in der finnischen Stadt Lahti dienten als Grundlage für die Kalibrierung von hochauflösenden Modellen unter Verwendung des Stormwater Management Models (SWMM) (z. B. Rossman, 2010). Die drei Einzugsgebiete wurden 2008-2010 messtechnisch überwacht und sind durch einen unterschiedlichen Urbanisierungsgrad charakterisiert. Der Versiegelungsgrad reicht von 86 % im innerstädtischen Einzugsgebiet 1 (5.87 ha) über 54 % im Einzugsgebiet 2 (6.63 ha) bis 19 % im vorstädtischen Einzugsgebiet 3 (12.6 ha) (Abbildung 1). Das messtechnisch nicht überwachte Einzugsgebiet Vesijärvi beschreibt den Teil der Stadt Lahti, der in den See Vesijärvi entwässert und hat eine Größe von 30 km² und umfasst die drei Kleineinzugsgebiete. Das Einzugsgebiet Vesijärvi weist eine Versiegelung von 27 % auf (Abbildung 1).

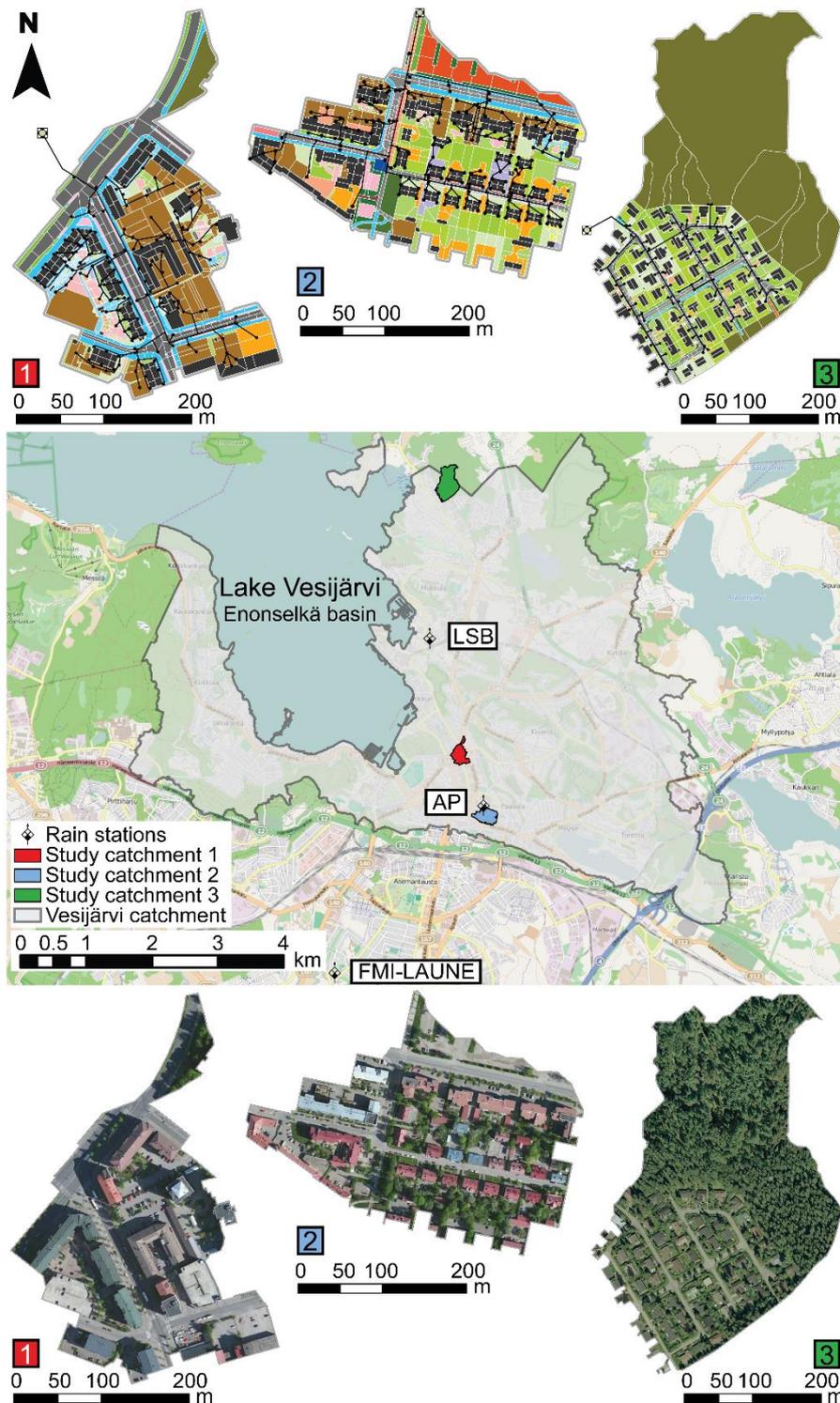


Abbildung 1: Die hochauflösende Oberflächenbeschreibung der Kleinzugsgebiete 1, 2, und 3 und deren Lage im Einzugsgebiet Vesijärvi (grau hinterlegt). Die verschiedenen Farben beschreiben unterschiedliche Oberflächentypen, schwarze Linien Kanalhaltungen und schwarze Punkte Einlässe (modifiziert von Krebs, 2016).

3 Methodik

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Erstellung hydrologischer Modelle für große, messtechnisch nicht überwachte, urbane Einzugsgebiete präsentiert, die in Krebs (2016) erarbeitet wurde. Die Methodik basiert auf einer detaillierten Oberflächenbeschreibung, die neben der Landnutzung auch die Oberflächenbeschaffenheit unterscheidet. Meist beruht die Oberflächenklassifizierung lediglich auf Landnutzungsdaten. Allerdings können auch Flächen gleicher Landnutzung unterschiedliche Versiegelungsgrade aufweisen, weshalb das hydrologische Verhalten auch innerhalb derselben Landnutzung variiert. Flächen gleicher Bodenbeschaffenheit (z. B. Asphaltflächen) dagegen verhalten sich hydrologisch ähnlich, großteils unabhängig von der Landnutzung in der sie auftreten. Daher können Modellparameter, die für unterschiedliche Oberflächen in Kleineinzugsgebieten kalibriert wurden, auf größere, messtechnisch nicht erfasste Einzugsgebiete übertragen werden. Eine zweite wichtige Grundlage bildet die Definition einer geeigneten räumlichen Modellauflösung, die, (i) die zeitliche Dynamik urbaner Abflussereignisse ausreichend genau replizieren kann, (ii) die direkte Simulation von NWBs erlaubt und (iii) die manuelle Korrektur und Ergänzung von räumlichen Daten auf ein Minimum reduziert. Zuletzt bedarf es einer automatisierten Methode das Einzugsgebiet in Teileinzugsgebiete zu unterteilen. Als erster Schritt wurden für die Kleineinzugsgebiete hochaufgelöste Modelle unter Verwendung des Stormwater Management Models (SWMM) erstellt und unabhängig kalibriert. Für diese Modelle wurden verfügbare Daten (Oberfläche und Kanalnetzwerk) durch Daten ergänzt und korrigiert, die in Feldbesuchen erhoben wurden (Krebs et al., 2013; 2014). Die für diese Modelle erstellte Oberflächenbeschreibung erlaubt eine direkte Simulation von NWBs und bietet zugleich die Basis zur Übertragung kalibrierter Modellparameter. Anhand der erstellten Modelle wurden Untersuchungen zur Definition einer hinreichenden räumlichen Modellauflösung durchgeführt. Dabei wurde die Auflösung durch eine Verkürzung des Kanalnetzes mit Hilfe von minimal betrachteten Rohrdurchmessern reduziert. Eine Betrachtung von Haltungen mit einem Mindestdurchmesser von z. B. 300 mm reduziert die Kanallänge, damit die Einlässe und zuletzt die räumliche Modellauflösung durch eine Reduktion der Teileinzugsgebiete. Neben dem üblicherweise verwendeten Zugang, aggregierte Teileinzugsgebiete mit aggregierten Parameterwerten

zu versehen wurde auch eine neue Methodik entwickelt, die eine hohe Oberflächenauflösung auch bei einem aggregierten Kanalnetz unterstützt.

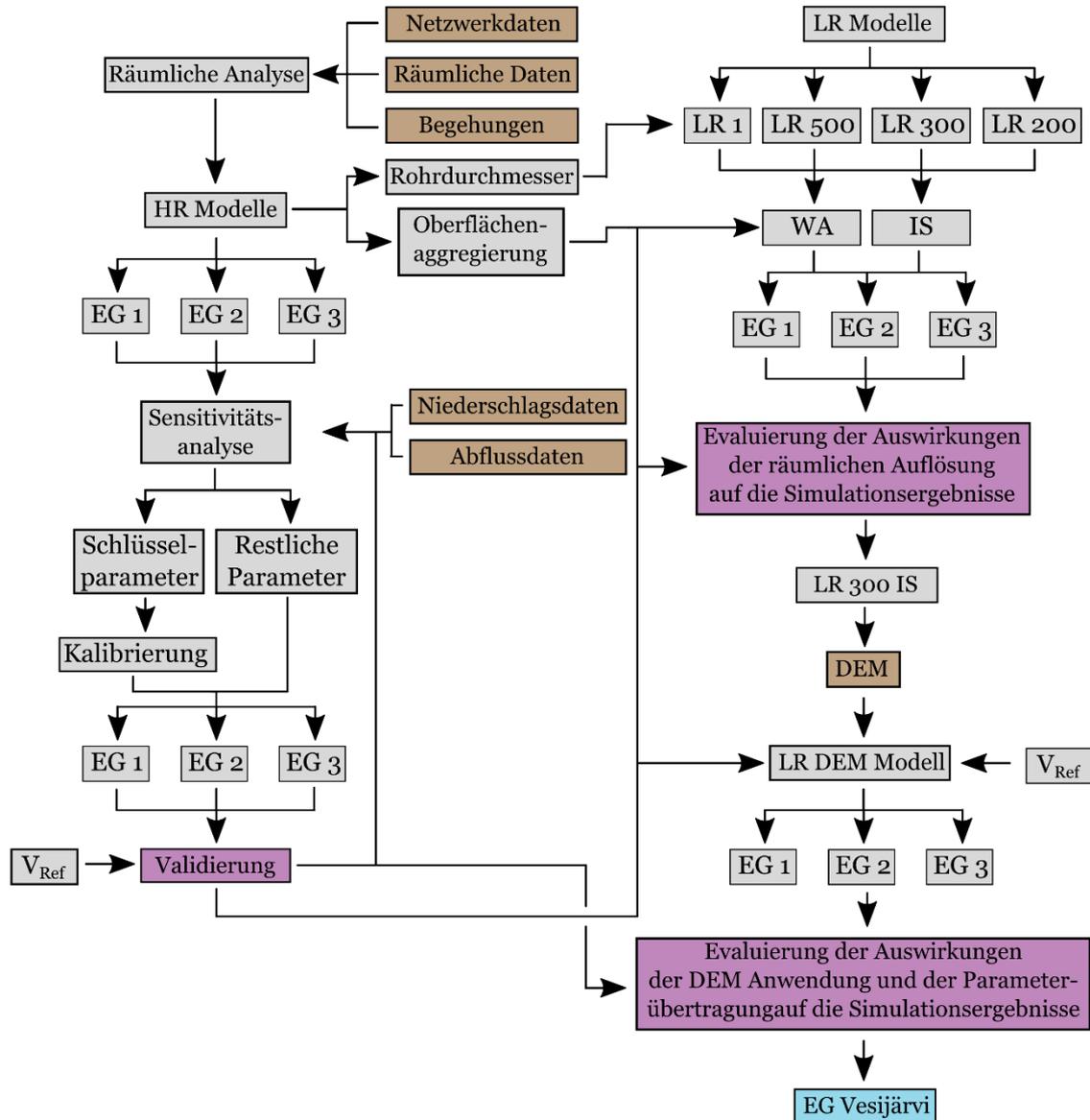


Abbildung 2: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Arbeitsschritte der Studie (modifiziert von Krebs, 2016).

Innerhalb der Teileinzugsgebiete wurde die Unterteilung nach der Oberflächenbeschaffenheit beibehalten, die die direkte Übernahme von zuvor kalibrierten Modellparametern erlaubt. Da eine genaue Fließweg erfasst für den Oberflächenabfluss und damit eine genaue Einteilung in Teileinzugsgebiete für große Einzugsgebiete nicht möglich ist, wurden auch

die Auswirkungen einer automatisierten Unterteilung des Einzugsgebietes, die auf einem digitalen Geländemodell (DGM) beruht, auf die Simulationsergebnisse untersucht. Zuletzt wurden die unabhängig kalibrierten Parametersets unter den Kleineinzugsgebieten getauscht um zu evaluieren inwieweit eine Anwendung im großen Einzugsgebiet Vesijärvi hydrologisch vertretbar ist, unter der Annahme, dass, wenn alle drei Parametersets in allen Kleineinzugsgebieten hinreichende Resultate liefern, eine Übertragung auf das Einzugsgebiet Vesijärvi vertretbar ist. Abbildung 2 veranschaulicht die Arbeitsschritte dieser Studie.

4 Ergebnisse

Die hochauflösenden Modelle erzielen durchwegs gute Ergebnisse in Bezug auf Abflussvolumen und Abflussspitze. Eine hochauflösende, oberflächenorientierte Modellbeschreibung hat neben der direkten Simulationsmöglichkeit für NWBs noch einen weiteren Vorteil. Trotz der hohen Auflösung hält sich die Anzahl der unterschiedlichen Flächentypen in Grenzen wodurch sich die Anzahl der Kalibrierungsparameter niedrig halten lässt. Kleineinzugsgebiet 1 wurde mit nur 8 Parametern kalibriert trotz einer Auflösung von 690 Teileinzugsgebieten. Untersuchungen zur hinreichenden räumlichen Modellauflösung haben gezeigt, dass ein Netzwerk mit einem Mindestdurchmesser von 300 mm und einer darauf basierenden Einzugsgebietsunterteilung die zeitliche Dynamik urbaner Abflussereignisse hinreichend genau wiedergeben kann. Weiters wurde festgestellt, dass, obwohl eine DGM-basierte Einzugsgebietsunterteilung viele Details der urbanen Oberfläche nicht berücksichtigen kann, die produzierten Simulationsergebnisse nicht stark beeinflusst werden. Die hydrologische Rechtfertigung zur Übertragung von Modellparametern auf das Einzugsgebiet Vesijärvi wurde durch einen Tausch von Parametersets zwischen den Teileinzugsgebieten untersucht. Hier zeigte sich, dass, obwohl das einzugsgebiets-spezifische Parameterset meist die besten Simulationsergebnisse lieferte, übertragene Sets nur wenig schwächer abschnitten (Abbildung 3).

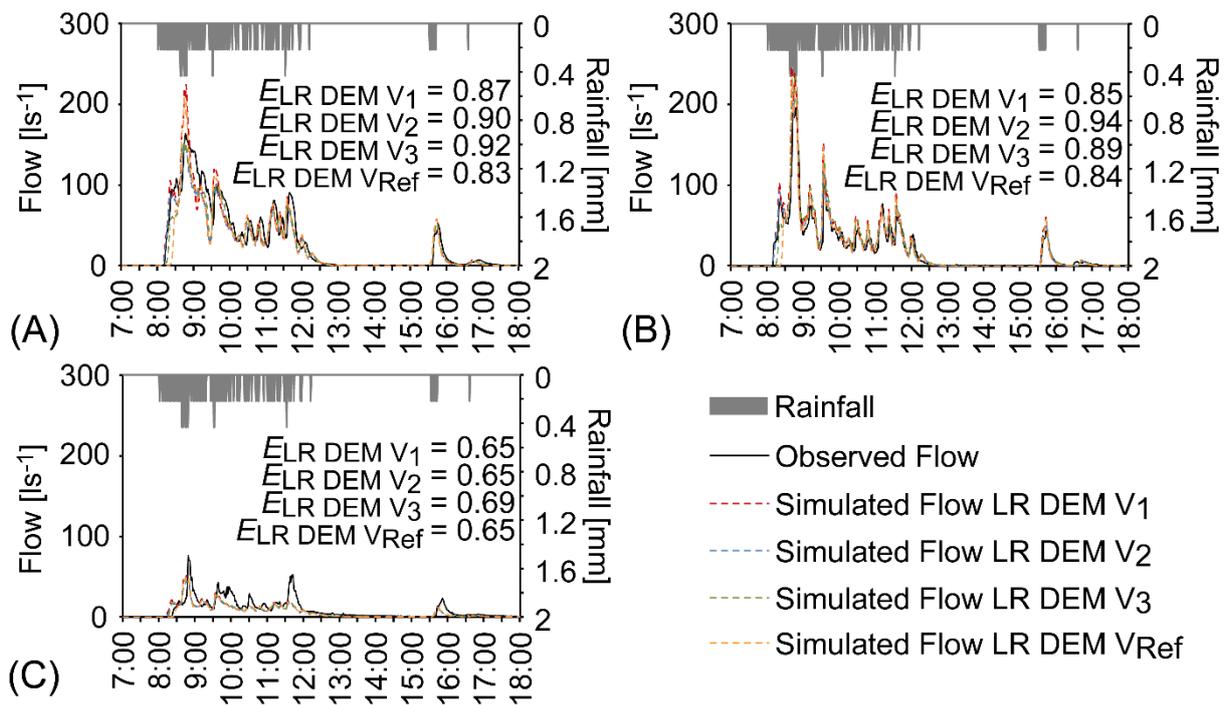


Abbildung 3: Hydrographen für das LR-DEM Modell der Kleineinzugsgebiete und die Parametersets V1, V2, und V3 (modifiziert von (Krebs et al., 2016)).

5 Schlussfolgerungen

Die beschriebene Methodik wurde für das Einzugsgebiet Vesijärvi angewandt (Abbildung 4). Das so erstellte Modell erlaubt nun die Evaluierung von NWBs auf Stadtgebietsebene in Lahti und unterstützt die Entscheidungsfindung in Bezug auf die Auswahl passender NWBs, und deren optimale Kombination und Lage für ein optimales Trade-off zwischen Kosten und hydrologischen Zielen.

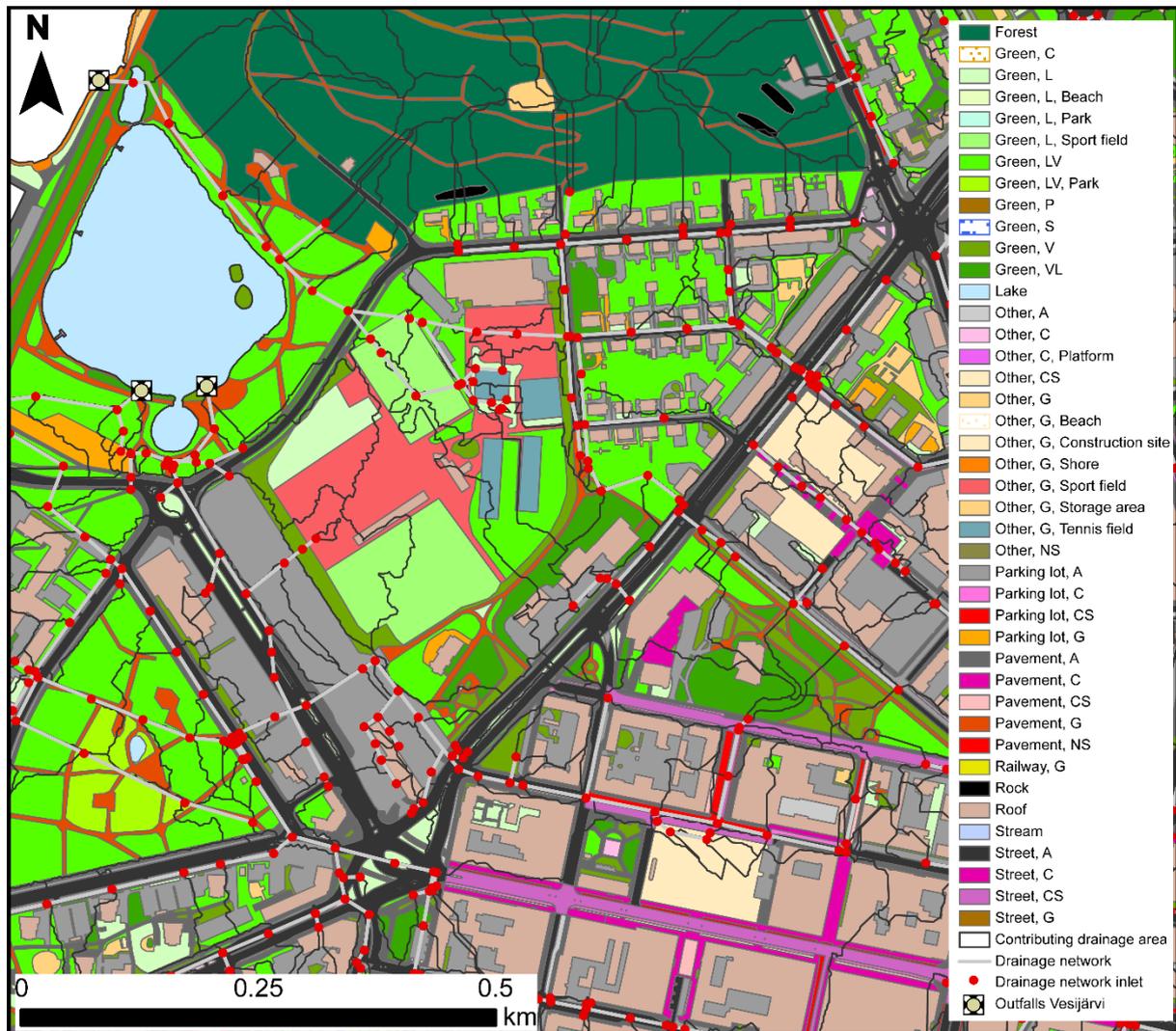


Abbildung 4: Ein Ausschnitt aus dem Modell für das Einzugsgebiet Vesijärvi für einen Bereich der Innenstadt (modifiziert von (Krebs et al., 2016)).

6 Literatur

Amaguchi H., Kawamura A., Olsson J. und Takasaki T. (2012). Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation. *Journal of Hydrology*, **420–421**, 205–215.

Arnold Jr C.L. und Gibbons C.J. (1996). Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, **62**(2), 243–258.

Cheng S.J. und Wang R.Y. (2002). An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes*, **16**(7), 1403–1418.

- Gironás J., Niemann J.D., Roesner L.A., Rodriguez F. und Andrieu, H. (2010). Evaluation of methods for representing Urban Terrain in storm-water modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, **15**(1), 1–14.
- Haase D. (2009). Effects of urbanisation on the water balance - A long-term trajectory. *Environmental Impact Assessment Review*, **29**(4), 211–219.
- Krebs G. (2016). Spatial Resolution and Parameterization of an Urban Hydrological Model: Requirements for the Evaluation of Low Impact Development Strategies at the City Scale. [online] <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/20293> (Zugegriffen 7. Juli 2016).
- Krebs G., Kokkonen T., Setälä H. und Koivusalo, H. (2016). Parameterization of a Hydrological Model for a Large, Ungauged Urban Catchment. *Water*, **8**(10), 443.
- Krebs G., Kokkonen T., Valtanen M., Koivusalo H. und Setälä, H. (2013). A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization. *Urban Water Journal*, **10**(6), 394–410.
- Krebs G., Kokkonen T., Valtanen M., Setälä H. und Koivusalo, H. (2014). Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **512**(0), 482–497.
- Marsalek J., Jiménez-Cisneros B., Karamouz M., Malmquist P.-A., Goldenfum J. und Chocat B. (2007). *Urban Water Cycle Processes and Interactions*, UNESCO, Taylor & Francis, Paris, France.
- Rossman L.A. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Ruth O. (2003). The effects of de-icing in Helsinki urban streams, Southern Finland. *Water Science and Technology*, **48**(9), 33–43.
- Schueler T.R., Fraley-McNeal L. und Cappiella K. (2009). Is Impervious Cover Still Important? Review of Recent Research. *Journal of Hydrologic Engineering*, **14**(4), 309–315.
- Shuster W.D., Bonta J., Thurston H., Warnemuende E. und Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, **2**(4), 263–275.
- Sillanpää N. und Koivusalo, H. (2015). Impacts of urban development on runoff event characteristics and unit hydrographs across warm and cold seasons in high latitudes. *Journal of Hydrology*, **521**, 328–340.
- United Nations (2012). *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision, CD-ROM Edition*, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, USA.

US EPA (2000). *Low Impact Development (LID) - A Literature Review*, US EPA Office of Water (4203), Washington, DC, USA.

Valtanen M., Sillanpää N. und Setälä, H. (2014). Effects of land use intensity on stormwater runoff and its temporal occurrence in cold climates. *Hydrological Processes*, **28**(4), 2639–2650.

Korrespondenz an:

Gerald Krebs
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz,
Stremayrgasse 10/I, 8010 Graz
Tel.: +43 316 873 6767
Fax: +43 316 873 8367
Email: gerald.krebs@tugraz.at

