

Einfluss des Klimawandels auf die Leistung der Siedlungsentwässerung

C. Egger^{1*}, M. Honti¹ und M. Maurer^{1,2}

¹Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf

²ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften, Wolfgang-Pauli-Str. 15, CH-8093 Zürich

*Email des korrespondierenden Autors: christoph.egger@eawag.ch

Kurzfassung Zukünftige, von regionalen Klimamodellen vorhergesagte Änderungen der Niederschlagseigenschaften müssen zuerst in die für die Siedlungsentwässerung relevanten räumliche und zeitliche Skalen übertragen werden. Dazu verwenden wir ‚statistisches Downscaling‘, um synthetische Punktregenserien zu generieren. Diese können dann zur hydraulischen Analyse und Bemessung von Siedlungsentwässerungssystemen herangezogen werden. Wir analysierten damit den Einfluss des Klimawandels auf die hydraulische Leistungsfähigkeit eines ausgewählten Entwässerungssystems. Spezielles Augenmerk wurde dabei auf Unsicherheiten gelegt, welche (i) in der natürlichen Variabilität des Klimas und (ii) der Unsicherheit der Klimamodelle begründet sind. Die Analyse zeigt auf, dass die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen sowohl unter heutigem als auch zukünftigem Klima stark schwanken kann. Die Anteile von Schächten an denen das angewandte Bemessungskriterium nicht erfüllt wird, variiert zwischen 1,3 und 7,4 % (heutiges Klima) und 1,3 und 15,8 % (zukünftiges Klima). Damit zeigt sich eine Tendenz zu einer verschlechterten hydraulischen Leistungsfähigkeit unter zukünftigem Klima.

Schlagwörter: Klimawandel, Statistisches Downscaling, Siedlungsentwässerung

1 EINLEITUNG

Hochaufgelöste, historische Punktregenserien dienen als Eingangsdaten für hydraulische Modelle zur hydraulischen Analyse und Bemessung von Siedlungsentwässerungssystemen. Hochaufgelöste Regendaten sind erforderlich aufgrund der Sensibilität dieser Systeme auf kurzzeitige Änderungen der Regenintensität.

Es wird davon ausgegangen, dass sich der Klimawandel negativ auf die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen auswirkt (Milly et al., 2008), was entsprechende Massnahmen erforderlich machen würde. Eine Reihe globaler und regionaler Klimamodelle (GKM, RKM) prognostizieren Änderungen in der Regencharakteristika. Die Daten liegen allerdings nicht in der benötigten räumlichen und zeitlichen Auflösung vor.

Umgehen kann man diese Einschränkungen mit sogenanntem statistischen Downscaling. Dabei werden stochastische Methoden verwendet, welche Änderungen in den Eigenschaften von Punktniederschlag in feiner zeitlicher Auflösung auf Basis der grobskaligen Klimaprognosen beschreiben (Onof and Arnbjerg-Nielsen, 2009).

Hauptziel der Arbeit ist es, den Einfluss des Klimawandels auf die hydraulische Leistung (Rückstau) eines ausgewählten Entwässerungssystems in der Schweiz zu quantifizieren. Dabei verwenden wir 10 verschiedene Niederschlagsprognosen von kombinierten GKM und RKM, die wir mittels statistischem Downscaling in hochaufgelöste Regenserien umrechnen. Es liegt auf der Hand, dass dabei signifikante Unsicherheiten enthalten sind. Diese liegen im Wesentlichen begründet in (i) der Modellstrukturunsicherheit der GKM und RKM, (ii) der natürlichen Variabilität des Klimas und (iii) der Unsicherheiten beim Downscaling (Fatichi et al., 2012).

Die Verwendung von Punktniederschlag zur Bemessung von Siedlungsentwässerungssystemen und die Annahme, dass dieser über das Einzugsgebiet gleichverteilt ist, stellt insbesondere bei konvektiven Starkniederschlägen eine starke Vereinfachung dar. Trotz der dadurch gegebenen erheblichen Unsicherheiten, ist diese Annahme gängige Praxis (DWA, 2006). Wir beziehen uns auf diese Bemessungspraxis und ignorieren die räumliche Variabilität des Niederschlags innerhalb des Siedlungsgebietes.

2 ERZEUGUNG UND ANALYSE SYNTHETISCHER REGENSERIEN

2.1 Verwendete Modelle und Daten

Das Downscaling der durch verschiedene kombinierte GKM und RKM vorhergesagten Regeninformation erfolgt in mehreren Schritten.

In einem ersten Schritt verwendeten wir das *Neyman-Scott Rectangular Pulse (NSRP) Modell* (Cowpertwait, 1991, Rodriguez-Iturbe et al., 1987) für die stochastische Simulation von Niederschlag, mit der Parametrisierung wie von Fatichi et al. (2011a) beschrieben. Das Modell ist geeignet Punktregenserien mit einer Auflösung von bis zu einer Stunde zu erzeugen. Der Regengenerator wurde kalibriert mit einer gemessenen 30-jährigen Niederschlagsserie.

Die Anpassung der Parameter des NSRP-Modells an zukünftige klimatische Bedingungen erfolgte anhand der prognostizierten Änderungen wichtiger statistischer Regeneigenschaften wie in Kilsby et al. (2007) beschrieben. Dabei wird angenommen, dass die Änderungen der statistischen Eigenschaften auf feiner Skala proportional zu denen auf grober Skala sind. Dazu verwendeten wir jeweils Ergebnisse von 10 ausgewählten kombinierten GKM und RKM für die Kontrollperiode 1981-2010 und Referenzperiode 2036-2065, welche durch das Projekt ENSEMBLE zur Verfügung gestellt werden (van der Linden and Mitchell, 2009). Dabei nahmen wir das Treibhausgas-Emissionsszenario A1B (Nakicenovic and Swart, 2000) an. Gemäss Prein et al. (2011) ist das Emissionsszenario irrelevant solange der Projektionszeitraum nicht über 2050 hinaus geht. Da die in dieser Arbeit betrachtete Referenzperiode 2036-2065 um dieses Datum zentriert ist, vernachlässigten wir die Unsicherheit des Emissionsszenarios.

In einem zweiten Schritt verwenden wir ein multiplikatives Zufallskaskadenmodell um Regenserien in eine höhere Auflösung zu disaggregieren. Wir verwendeten das *Canonical Random Cascade Model* wie beschrieben in Molnar and Burlando (2005). Das Modell wurde kalibriert mit der gemessenen, in 10 minütiger Auflösung vorliegenden Regenreihe. Danach wandten wir es an, um die im ersten Schritt mit dem NSRP-Modell simulierten Regendaten in 10 minütige Auflösung zu disaggregieren.

2.2 Simulierte Regenserien

Wir gehen davon aus, dass stochastische Regengeneratoren die natürliche Variabilität des Klimas, inkl. den Extremregenereignissen (Viglione et al., 2012), auf befriedigende Weise wieder spiegeln (Fatichi et al., 2011b). Damit besteht die Möglichkeit die Variabilität des Klimas mit einer Vielzahl von Realisationen des stochastischen Regengenerators zu berücksichtigen (Fatichi et al., 2012). Deshalb wurden für die Kontrollperiode 100 Realisationen von 30-jährigen Regenreihen mit dem NSRP-Modell mit stündlicher Auflösung generiert. Entsprechend generierten wir für die Referenzperiode jeweils 100 Realisationen mit 10 unterschiedlichen Parametrisierungen abgeleitet aus den Ergebnissen der GKM/ RKM-Modellketten. Dadurch wird für die Referenzperiode die Modellstrukturunsicherheit der kombinierten GKM und RKM berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wurde mit jeder der simulierten Regenserie 100 Realisationen mit 10-minütiger Auflösung durch stochastische Disaggregation erzeugt. Auf diese Weise erzeugten wir 10.000 (Kontrollperiode) und 100.000 Realisationen (Referenzperiode) von 30 jährigen Regenreihen mit 10-minütiger Auflösung.

Da unser Fokus auf dem Überstauverhalten der Kanalnetze liegt, ist die Wiedergabe von Extremereignissen von entscheidender Bedeutung. Abbildung 1 zeigt für die Kontrollperiode observierte und mit dem NSRP-Modell simulierte jährliche maximale Regenhöhen für Dauerstufen von 1 und 24 h. Diese werden für eine Dauerstufe von 1 h erheblich unterschätzt insbesondere für grosse Wiederkehrintervalle. Dagegen gibt es eine gute Übereinstimmung für eine Dauerstufe von 24 h. Aus diesem Grund wurden die in stündlicher Auflösung vorliegenden simulierten Regenreihen auf eine fast tägliche Skala (1280 min) aggregiert und danach auf eine Skala von 10 min disaggregiert. Die Disaggregation erfolgt durch sukzessive Aufteilung der Regenmasse von einem gröberen auf zwei gleich lange feinere Zeitschritte. Deshalb muss die grob aufgelöste Regenreihe mit einem Zeitschritt vorliegen, welcher 2^n mal der gewünschten Zeitauflösung entspricht, wobei n die Anzahl der Disaggregationsschritte ist.

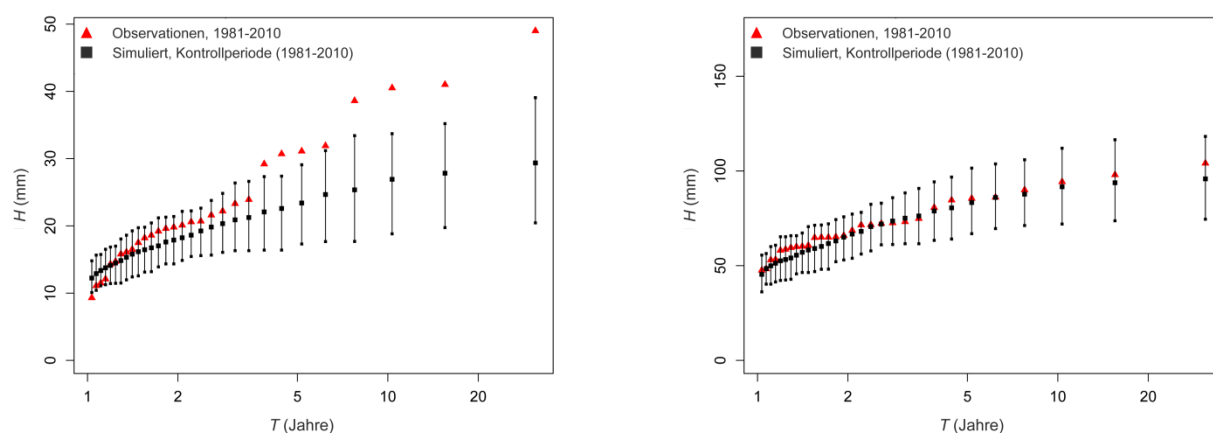


Abbildung 1: Observierte und simulierte jährliche maximale Regenhöhen H mit verschiedenen Wiederkehrintervallen T für Dauerstufen von 1 h (links) und 24 h (rechts). Simulierte Werte sind gegeben für die Kontrollperiode (1981-2010). Die quadratischen Punkte geben die mittlere simulierte Regenhöhe über 100 Realisationen wieder.

Die angegebenen Unsicherheitsintervalle beschreiben die Bereiche zwischen den 10- und 90%-Quantilen.

Um die Güte der Regendisaggregation bezüglich Starkniederschlag zu analysieren, benutzten wir das kalibrierte Modell um die auf eine Auflösung von 1280 min aggregierte beobachtete Regenreihe zu disaggregieren. Abbildung 2 zeigt beobachtete und aus 100 realisierten disaggregierten Regenreihen abgeleitete mittlere jährliche maximale Regenhöhen für verschiedene Dauerstufen. Es zeigt sich, dass das Modell die mittleren jährlichen maximalen Regenhöhen für Dauerstufen >20 min systematisch überschätzt.

Resultate des kombinierten Modells zur Regengenerierung und –disaggregation sind in Abbildung 3 wiedergegeben. Es werden bezogen auf die Kontroll- und Referenzperiode jährliche maximale Regenhöhen dargestellt und mit entsprechenden Observations verglichen. Alle beobachteten Werte liegen im Bereich der über die Kontrollperiode simulierten 10- und 90%-Quantile für eine Dauerstufe von 20 min (Abbildung 3, links). Die Modellergebnisse suggerieren, dass Starkniederschläge tendenziell zunehmen und grösseren Unsicherheiten unterliegen. Die in Abbildung 2 gezeigte systematische Überschätzung der maximalen jährlichen Regenhöhe mit einer Dauerstufe von 1 h wird auch in Abbildung 3, rechts deutlich.

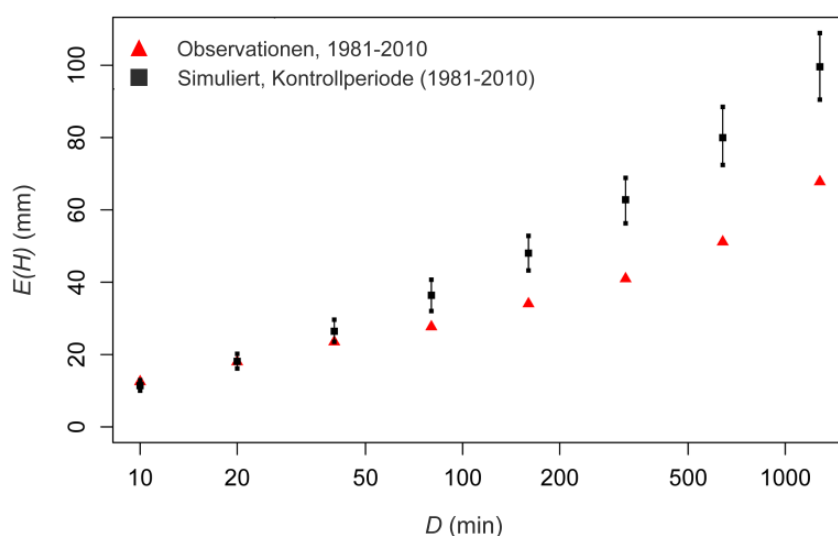


Abbildung 2: Observierte und simulierte mittlere jährliche maximale Regenhöhen $E(H)$ für verschiedene Dauerstufen D . Die quadratischen Punkte geben die Mittelwerte über 100 Realisationen wieder. Die angegebenen Unsicherheitsintervalle beschreiben die Bereiche zwischen den 10- und 90%-Quantilen.

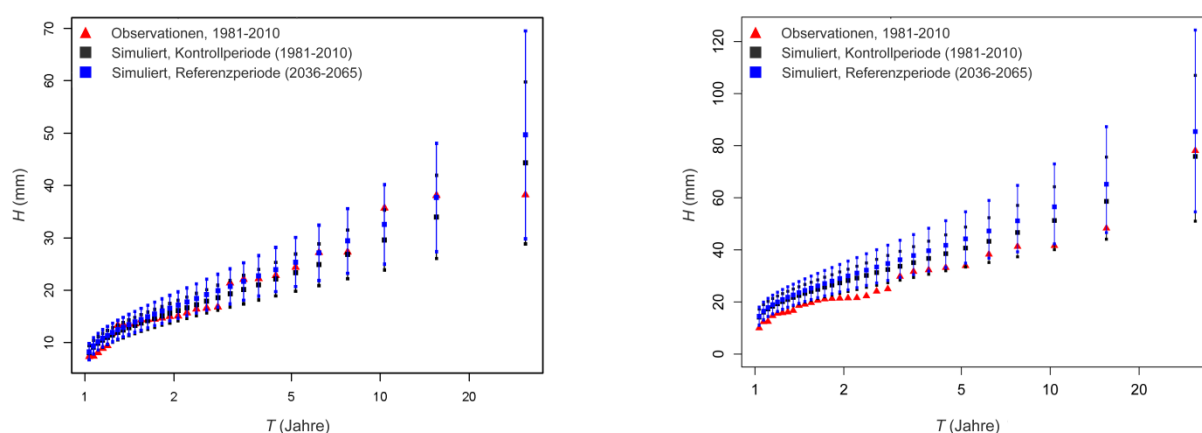


Abbildung 3: Observierte und simulierte jährliche maximale Regenhöhen H mit verschiedenen Wiederkehrintervallen D für Dauerstufen von 20 min (links) und 1 h (rechts). Simulierte Werte sind gegeben für die Kontrollperiode (1981-2010) und Referenzperiode (2036-2065). Die gezeigten Ergebnisse für die Referenzperiode basieren auf dem Modellausgang der 10 ENSEMBLE-Modellketten mit jeweils 10.000 realisierten Regenreihen. Die quadratischen Punkte geben jeweils die mittlere simulierte Regenhöhe über 10.000 Realisationen (Kontrollperiode) bzw. 100.000 Realisationen (Referenzperiode) wieder. Die angegebenen Unsicherheitsintervalle beschreiben die Bereiche zwischen den 10- und 90%-Quantilen.

3 EINFLUSS DES KLIMAWANDELS AUF DIE HYDRAULISCHE LEISTUNG

Die erzeugten Regenreihen stellen ein „probabilistisches“ Eingangssignal für das hydrodynamische Modell dar (Rossman, 2010). Entsprechend erhalten wir eine Verteilung der hydraulischen Modellprognosen und somit der Leistungsfähigkeit des Entwässerungssystems unter heutigem und zukünftigem Klima. Die Leistungsfähigkeit quantifizieren wir mit dem Anteil der Schächte an denen das Bemessungskriterium im simulierten Zeitraum von 30 Jahren nicht erfüllt wird. Das angewendete Bemessungskriterium gibt vor, dass Wasserstände über Schachtdeckelniveau nicht häufiger als 1 Mal in 5 Jahren vorkommen dürfen.

Durch den hohen Rechenaufwand wurden bisher nur eine begrenzte Anzahl von Simulationen mit den erzeugten Regenreihen durchgeführt. Dazu wurden für die Kontroll- und Referenzperiode jeweils drei simulierte 30-jährige Regenreihen ausgewählt, welche „hohe“, „mittlere“ und „niedrige“ extreme Regenhöhen einschließen. Die Auswahl erfolgte anhand der 90-, 50- und 10%-Quantile der jährlichen maximalen Regenhöhen über alle Realisationen. Es wurde unter der Vielzahl von Realisationen jeweils diejenige Realisation ausgewählt, bei der sämtliche jährliche maximale Regenhöhen mit Wiederkehrintervallen zwischen 4,4 und 15,5 Jahren sowie Dauerstufen zwischen 10 und 60 Minuten den genannten Quantilen nahezu entsprechen.

Die Tendenz zu extremen Starkniederschlägen sowie deren erhöhte Variabilität spiegelt sich auch in den Ergebnissen der hydraulischen Analyse wieder. Abbildung 4 gibt die Anteile der Schächte wieder, an denen das Bemessungskriterium nicht eingehalten wird. Es zeigt sich, dass die Prognoseunsicherheit auch unter heutigem Klima erheblich ist: an 1,3 bis 7,4 % der Schächte wird das Bemessungskriterium nicht eingehalten. Die Prognoseunsicherheiten sind bei Berücksichtigung des Klimawandels noch stärker ausgeprägt: 1,3 bis 15,8 %. Die Tendenz zu mehr Überstauereignissen ist umso ausgeprägter, je größer die durch die Regenreihe repräsentierten Quantile der jährlichen maximalen Regenhöhen sind. Eine deutliche Zunahme der Überstauereignisse ist nur unter dem Szenario erkennbar, bei dem die Regenseerien „hohe“ extreme Regenhöhen beinhalten.

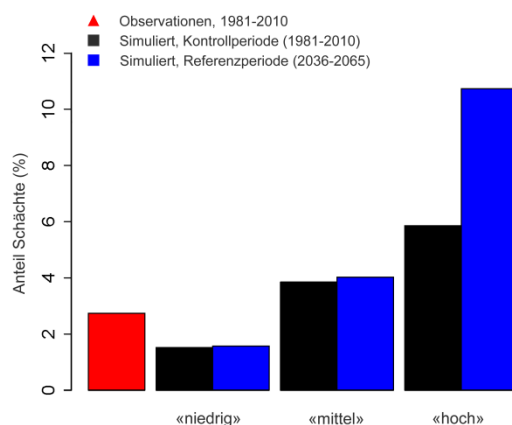


Abbildung 4: Anteile der Schächte, an denen das Bemessungskriterium nicht erfüllt wird bei Verwendung der (i) observierten Regenreihe und (ii) simulierten Regenreihen als Eingangsdaten für die hydraulische Simulation. Resultate bei Verwendung simulierter Regenreihen sind gegeben für die Kontroll- und Referenzperiode als auch für die drei Szenarien, die Regenserien mit „niedrigen“, „mittleren“ und „hohen“ extremen Regenhöhen beinhalten.

4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Die durch die Disaggregation verursachte systematische Überschätzung von extremen Regenhöhen mit Dauerstufen >20 min sind nicht befriedigend, da insbesondere in grösseren Einzugsgebieten auch länger andauernde Starkniederschlagsereignisse zu kritischen Überstauereignissen führen können. Dies gilt umso mehr wenn auch die Auswirkungen auf die Entlastung von Mischwasser untersucht werden soll. Es ist auch unklar, ob die durch die stochastische Disaggregation beschriebene Variabilität der Niederschlagsextrema korrekt wiedergegeben wird. Deshalb ist es gerechtfertigt auch komplexere Modelle zur Regendisaggregation auf deren Eignung zu prüfen. So wäre die Verwendung eines skalen- und regenintensitätsabhängigen mikrokanonischen Zufallskaskadenmodells eine Option. Durch die Berücksichtigung von Skalen- und Regenintensitätsabhängigkeit kann die Wiedergabe von wesentlichen Regeneigenschaften verbessert werden (Rupp et al., 2009).

Weiterhin sollte die Bedeutung des Klimawandels und der Unsicherheiten mit Monte-Carlo-Simulationen auf der Basis einer grösseren Auswahl von simulierten Langzeitserien untersucht werden. Ebenfalls anzustreben ist die Einbeziehung verschiedener Kanalnetze, da sich die Anfälligkeit der Systeme auf Änderungen in den Starkniederschlägen von Fall zu Fall unterscheiden kann.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Verschiedene Klimamodelle sagen insgesamt eine Tendenz zu stärkeren Extremniederschlägen voraus. Diese Verschiebung spiegelt sich in der hydraulischen Leistung des untersuchten Entwässerungssystems wieder. Die Variabilität von Extremniederschlägen ist selbst unter stationären klimatischen Bedingungen beträchtlich und vergrössert sich unter Einbeziehung des Klimawandels. Diese Variabilität wird auf die hydrodynamischen Prognosen in signifikanter Weise übertragen.

Allerdings ignoriert die heutige Bemessungspraxis ebenfalls die natürliche Variabilität des Klimas, da sie auf einer einzelnen gemessenen Regenserie basiert. Es ist deshalb schon schwierig die Frage nach der aktuellen Leistungsfähigkeit ohne Klimawandel zu beantworten. Stochastische Regengeneratoren können dafür eine zentrale Rolle spielen um die Variabilität abbilden und quantifizieren zu können.

Der Einbezug des Klimawandels in die hydraulische Bewertung von Entwässerungssystemen muss zusätzlich die Unsicherheit der Klimaprognosen einschliessen. Statistisches Downscaling unter Verwendung verschiedener Klimamodelle wird dafür ebenfalls von zentraler Bedeutung sein. Die Verwendung der auf diese Weise erzeugten Regeninformation in hydraulischen Simulationen erhöht den Aufwand der Analysen erheblich und stellt sehr hohe Anforderungen an Simulations- und Rechenkapazität. Wie und

ob die diskutierten Methoden in die gängige Bemessungspraxis einfließen werden können, ist deshalb noch offen.

Abschliessend können wir aus den Resultaten schlussfolgern, dass wir einen Einfluss des Klimawandels auf die Leistung der Siedlungsentwässerung erwarten. Allerdings ist dieses Resultat noch sehr unsicher. Insbesondere müssen wir geeignetere Methoden für das statistische Downscaling finden, welche die relevanten Extremregen besser abbilden und zusätzlich die hydraulischen Analysen verfeinern.

6 REFERENZEN

- Cowpertwait, P.S.P., 1991. Further developments of the Neyman-Scott clustered point process for modeling rainfall. *Water Resour. Res.* 27 (7), 1431-1438.
- DWA, 2006. Arbeitsblatt DWA-A 118, Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.
- Fatichi, S., Ivanov, V.Y. and Caporali, E., 2011a. AWE-GEN Advanced Weather Generator. Technical Reference, version 1.0.
- Fatichi, S., Ivanov, V.Y. and Caporali, E., 2011b. Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Advances in Water Resources* 34 (4), 448-467.
- Fatichi, S., Ivanov, V.Y. and Caporali, E., 2012. On the search for vital details of climate change, 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz, Switzerland.
- Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A. and Wilby, R.L., 2007. A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling & Software* 22 (12), 1705-1719.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P. and Stouffer, R.J. (2008) Stationarity is dead: Whither water management?, *Science* 319(5863), 573-574.
- Molnar, P. and Burlando, P., 2005. Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. *Atmospheric Research* 77 (1-4 SPEC. ISS.), 137-151.
- Nakicenovic, N. and Swart, R., 2000. Special report on emissions scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group, Policy, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Onof, C. and Arnbjerg-Nielsen, K., 2009. Quantification of anticipated future changes in high resolution design rainfall for urban areas. *Atmospheric Research* 92 (3), 350-363.
- Prein, A.F., Gobiet, A. and H., T., 2011. Analysis of uncertainty in large scale climate change projections over Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 20 (4), 383-395.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R. and Isham, V., 1987. Some models of rainfall based on stochastic point processes., pp. 283-298, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*.
- Rossman, L.A., 2010. Storm Water Management Model, User's Manual, EPA, United States Environmental Protection Agency.
- van der Linden, P. and Mitchell, J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Changes and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- Rupp, D.E., Keim, R.F., Ossiander, M., Brugnach, M. and Selker, J.S. (2009) Time scale and intensity dependency in multiplicative cascades for temporal rainfall disaggregation. *Water Resour. Res.* 45(7), W07409.
- Viglione, A., Castellarin, A., Rogger, M., Merz, R. and Blöschl, G., 2012. Extreme rainstorms: Comparing regional envelope curves to stochastically generated events. *Water Resources Research* 48 (1), W01509.