

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Jegelka, Simon; Kluding, Patrick; Nüßer, Wilhelm**

## **Agentenbasierte Logistiks simulation im mobilen Hochwasserschutz**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107072>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Jegelka, Simon; Kluding, Patrick; Nüßer, Wilhelm (2020): Agentenbasierte Logistiks simulation im mobilen Hochwasserschutz. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 295-304.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Agentenbasierte Logistiksimulation im mobilen Hochwasserschutz

Simon Jegelka  
Patrick Kluding  
Wilhelm Nüßer

Die Simulation von Arbeitsprozessen wird ein immer wichtigerer Faktor, um schnell, situationsgerecht und transparent handeln zu können. Dies gilt auch im Bereich des Wasserbaus und im Speziellen dem mobilen Hochwasserschutz. Der Artikel zeigt anhand des Praxisbeispiels der Stadt Köln auf, wie eine agentenbasierte Simulation der Logistikprozesse den mobilen Hochwasserschutz dynamisiert, Unsicherheiten reduziert und eine hochwassersynchrone Reaktion ermöglicht. Der Transfer der Ergebnisse eines Forschungsprojektes in die Praxis ist hierbei erfolgreich gelungen.

Stichworte: mobiler Hochwasserschutz, agentenbasierte Simulation, Logistikabläufe, Köln, Transfer von Forschungsergebnissen

## 1 Einleitung

Die Simulation von Arbeitsprozessen zur Entscheidungsunterstützung und Optimierung von Abläufen wird in vielen Industrien ein immer wichtigerer Faktor, um schnell und transparent handeln zu können.

Um die Nutzung von Simulationsmodellen aus anderen Industrien auf den mobilen Hochwasserschutz zu übertragen, wurde im Jahr 2015 im Rahmen des Spitzenclusters der Bundesregierung „Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe“ (it's OWL) das Transferprojekt TopoOpt aufgesetzt.

Gemeinsam mit den Stadtentwässerungsbetrieben Köln, AöR, welche im Kölner Stadtgebiet für den operativen Hochwasserschutz entlang 70 km Rheinlinie zuständig sind, wurden die forschungsnahen Transferergebnisse daraufhin in der Praxis umgesetzt. So konnte im Jahr 2019 das simulationsgestützte Entscheidungsunterstützungstool PLATHO in Betrieb genommen werden. Die hierzu notwendige Weiterentwicklung und Anwendung der Forschungsannahmen auf die komplexe Realität des mobilen Hochwasserschutzes brachten weitere Erkenntnisse und Ergebnisse, die nachfolgend beschrieben werden.

Grundlegende Idee des Vorhabens ist es, die Reaktionsfähigkeit des mobilen Hochwasserschutzsystems auf die dynamischen Umweltbedingungen eines Hochwasserereignisses zu verbessern. So gleicht sich keine Hochwasserwelle in den Punkten Steiggeschwindigkeit, Zwischen- und Endpegel sowie der Gesamtzeitdauer, wie der anstehenden Abbildung 1 beispielhaft zu entnehmen ist.

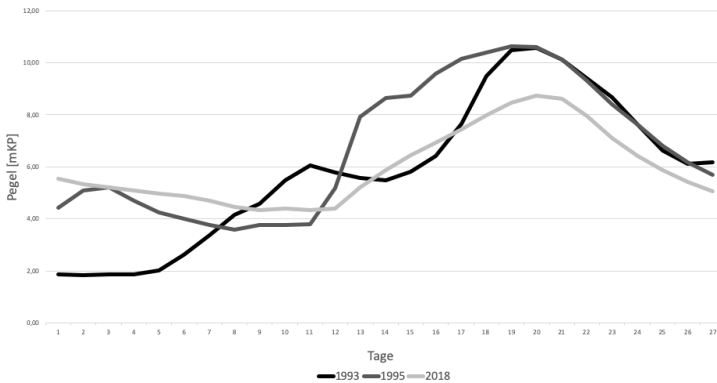


Abbildung 1: Verläufe historischer Hochwasserereignisse in Köln

Als System des mobilen Hochwasserschutzes wird innerhalb des Projekts die notwendige Lagerung, Logistik und Aufbau verbunden mit der Konfiguration des technischen Systems, in diesem Fall eines Dammbalkensystems, verstanden.

Um flexibel, sicher und angemessen auf ein anstehendes Hochwasserereignis reagieren zu können, soll mit Hilfe der Simulation eine optimale Systemkonfiguration gefunden werden, um auf dieser Basis eine Entscheidung zur operativen Prozessinitiierung zu treffen.

## 2 Potentiale der agentenbasierten Simulation im Hochwasserschutz

### 2.1 Die agentenbasierte Logistiksimulation

Mit Simulationsmodellen wird üblicherweise ein abstrahiertes Abbild relevanter Eigenschaften der Realität erstellt, um mit Hilfe von Experimenten das Verhalten des Systems auf verschiedene Parameter- und Einflussvariationen zu untersuchen. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen der Modellie-

rung, wie dem ereignisdiskreten oder dem System Dynamics Ansatz, bildet die agentenbasierte Modellierung das Zusammenspiel vieler unabhängiger Einheiten ab.

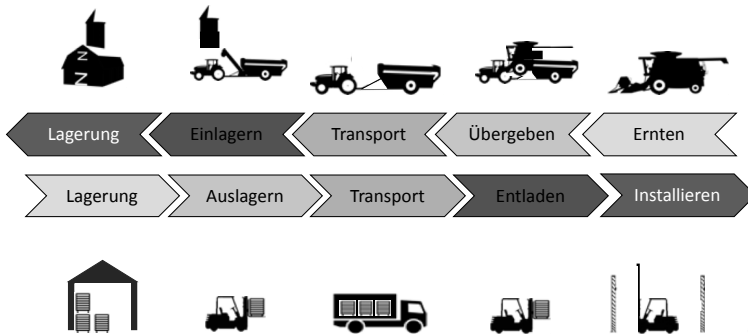
Als Agenten des Hochwasserschutzsystem kommen beispielsweise einzelne Gabelstapler im Lager, LKWs oder Aufbauteams in Frage. Während jeder Agent ein eigenes Regelwerk hat, müssen sie untereinander Absprachen treffen und interagieren, um das Gesamtziel zu erreichen (Mewes und Schuhmann 2019). Die Prozesse und Verhalten der Agenten beeinflussen sich wechselseitig, so dass z.B. Wartezeiten auf ein noch nicht anwesendes Aufbauteam den Aufbauprozess des mobilen Wandsystems verzögern.

Vorteil der agentenbasierten Modellierung ist es, dass Verhalten des Gesamtsystems gut auf sich ändernde Rahmenbedingungen untersuchen zu können. So kann entdeckt werden, dass der Einsatz eines weiteren LKWs keinen Vorteil mehr bringt, da sich nur zusätzliche Wartezeiten bei der Entladung an einer speziellen Hochwasserschutzmaßnahme ergeben. Auf diese Weise können verschiedene Szenarien simuliert werden, um eine optimale Konstellation zu finden.

## 2.2 Forschungsprojekt TopoOpt

Während die Vorteile der agentenbasierten Simulation in der Landwirtschaft bereits untersucht waren, bestand noch keine Anwendung im Hochwasserschutz. Innerhalb des landwirtschaftlichen Ernteprozesses geht es bspw. darum, dass Feld optimal zu mähen, die Ernteerträge abzutransportieren und am Ende des Prozesses im Silo einzulagern. Um hiermit verbundene Unsicherheiten zu umgehen, kann der Prozess vorteilhaft zur Planung, Kontrolle und Dokumentation simuliert werden (Steckel et al. 2013).

Im Forschungsprojekt TopoOpt wurden die Möglichkeiten aufgezeigt, die Abbildung der Logistik- und Aufbauprozesse im mobilen Hochwasserschutz ähnlich vorzunehmen. Wie in Abbildung 2 verdeutlicht, kann generell festgestellt werden, dass es sich um einen inversen Prozessablauf handelt. Während die Ernte durch die Prozessteilnehmer vom „Einsatzort“ Feld zum Silo verfahren wird, findet beim Hochwasserschutz ein Transport der mobilen Schutzelemente zum „Einsatzort“ Flussufer statt.



**Abbildung 2:** Prozessablauf in Landwirtschaft und Hochwasserschutz

Grundsätzlich zeigte das Forschungsprojekt auf, dass die Modellierung des Hochwasserschutzprozesses vorteilig genutzt werden kann. So kann der Logistik- und Aufbauprozess mittels der Simulation zur Hochwasservorhersage synchronisiert werden. Abläufe können demnach rechtzeitig und anforderungsbezogen ausgelöst werden.

Ein erster prototypischer Test der Simulation fand im Rahmen einer Hochwasserschutzübung in Köln statt.

### 3 Der mobile Hochwasserschutz der Stadt Köln

Die Stadt Köln ist in der Vergangenheit mehrfach von Hochwassern betroffen gewesen. Die letzten schweren Hochwasser des Rheins ereigneten sich in den Jahren 1993 und 1995 im Abstand von nur 13 Monaten (s.a. Abbildung 1). Sie gaben den Anstoß zur Einführung eines umfangreichen mobilen Wandsystems. Ein solches mobiles Wandsystem kann nur dann effektiv eingesetzt werden und den erforderlichen Schutz sicherstellen, wenn die für den Aufbau notwendigen Logistikprozesse entsprechend leistungsfähig ausgelegt sind.

#### 3.1 Eckdaten des Hochwasserschutzes in Köln

Um den städtebaulichen Anforderungen Kölns Rechnung zu tragen, wurde in weiten Bereichen entlang des Rheins auf die Errichtung hoher feststehender Mauern zum Hochwasserschutz verzichtet, was einen entsprechend umfangreichen mobilen Schutz zur Folge hat, um die Schutzziele eines 100-

jährlichen, bzw. - im nördlichen Stadtgebiet - 200-jährlichen Hochwassers zu erreichen.

Der mobile Schutz von 10,7 km Länge verteilt sich auf 70 km Rheinufer. Installiert werden bei einem Vollaufbau in etwa 40.000 Dammbalken und 4.000 Stützen, die sich zu einer Schutzfläche von ca. 14.500 m<sup>2</sup> summieren.

Die eingesetzten Stützen messen von 0,30 m bis zu 4,20 m Höhe und sind mit einem „Poka Yoke“-Aufnahmesystem versehen, so dass jede Aufnahmeplatte einer Stütze spezifisch für genau einen Stütztyp ist. Dies verhindert einerseits den Einbau falscher Stütztypen, bedingt aber andererseits die punktgenaue Anlieferung des richtigen Stütztyps an die vorgesehene Einbaustelle.

Durch eine erhebliche Anzahl von Sonderlösungen ergeben sich ca. 70 verschiedene Stütztypen und über 80 verschiedene Dammbalkenlängen. Dies kombiniert mit der Tatsache, dass mit steigendem Pegel des Rheins bis zu acht Lagerstätten Material zu insgesamt 365 Aufbaumaßnahmen liefern müssen, zeigt in Grundzügen die Komplexität des Gesamtsystems mobiler Hochwasserschutz in Köln.

### 3.2 Ziele der Dynamisierung des Planungs- und Entscheidungsprozesses

Die zentrale Einflussgröße für die Abwicklung eines eintretenden Hochwassers ist die Steiggeschwindigkeit des Rheins, gemessen in Zentimeter pro Stunde. Sie bestimmt in entscheidendem Maße die logistischen Abläufe, da die vorgelagerten Transporte von den Lagerstätten zu den Aufbauorten und die darauffolgenden Aufbauprozesse der mobilen Elemente vor Erreichen des für die einzelne Maßnahme relevanten Pegels abgeschlossen sein müssen. Die Steiggeschwindigkeit des Rheins bestimmt also die erforderliche Geschwindigkeit des gesamten (logistischen) Ablaufs.

Vor der Entwicklung der Simulationslösung war die dem (logistischen) Prozess zugrundeliegende Steiggeschwindigkeit je nach Pegelhöhe mit 15 bzw. 10 cm/h fest vorgegeben. Es lag somit ein statisches Planszenario vor, bei dem der gesamte Logistik- und Aufbauprozess auf eine Prozessgeschwindigkeit fixiert war. Da aber, wie erwähnt, jedes Hochwasserereignis seine eigene Charakteristik besitzt, musste während jedes Hochwassereinsatzes durch Einzelfallentscheidungen der operativen Einsatzleitung eine Prozess-

anpassung auf Basis der Steigggeschwindigkeit durchgeführt werden, was zu Effizienzverlusten führte.

## 4 Ergebnisse der Umsetzung

### 4.1 Planungstool Hochwasserschutz

Mit dem Planungstool Hochwasserschutz (PLATHO) steht im Ergebnis ein Expertensystem zur Verfügung, mit dem dynamisch auf ein anstehendes Hochwasser mit seinen spezifischen Steigggeschwindigkeiten und Zwischenpegelständen reagiert werden kann. Den Ausgangspunkt einer Simulation stellt die Pegelvorhersage dar.

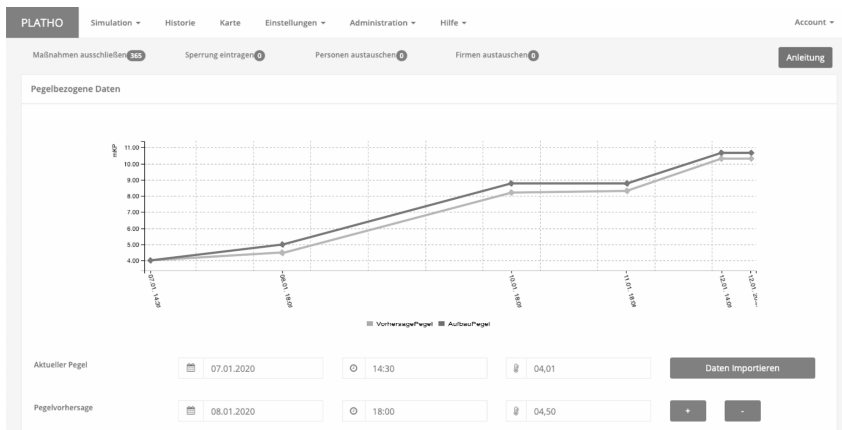


Abbildung 3: Eingabe des Vorhersage- und Aufbaupegels

Durch Daten-Import und manuelle Eingabe von Stützpunkten lassen sich Pegelverläufe anlegen. Hierbei wird zunächst die Vorhersage (untere Linie) angelegt und durch einen Aufbaupegel (obere Linie) ergänzt (siehe Abbildung 3).

Der Aufbaupegel stellt einen imaginären Pegel dar, nach dem sich der Aufbauprozess richtet. Durch ein zeitliches Vorziehen des Aufbaupegels kann Sicherheit in den Punkten Fertigstellungszeitpunkt und Aufbauhöhe gegenüber der aktuellen Vorhersage erreicht werden.

Weitere Einstellungen, wie Einsatzzeiten, -tage und zur Verfügung stehendes Einsatzequipment lassen den Simulationsraum, wenn notwendig, weiter einschränken und ermöglichen eine Kostenoptimierung.

Aufgrund der mit steigendem Zeithorizont zunehmenden Unsicherheit der Vorhersagen ermöglicht PLATHO es, nach Erstellung einer ersten „In-Advance“-Simulation, weitere „In-The-Meantime“-Simulationen auf die frühere Simulation aufzusetzen. Damit können sich im Einsatzverlauf verändernde Prognosen und Einsatzlagen abgebildet werden.

#### **4.2 Dynamische Reaktion auf zu erwartenden Höchstpegel: Teilaufbau**

Mittels Simulation werden alle möglichen Szenarien der Gefahrenabwehr ermittelt. Automatisch werden Hochwasserschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt, welche außerhalb der Pegelprognose liegen.

Das in Köln verbaute mobile System ermöglicht Teilaufbauten, d.h. die mobile Wand wird (entsprechend sichere Prognose vorausgesetzt) nicht bis zur vollen Höhe, sondern nur mit einem Teil der Dammbalken aufgebaut. Innerhalb von PLATHO wurden die Bereiche der mobilen Wand definiert, in denen ein solcher Teilaufbau besonders effizient umgesetzt werden kann. Die automatische Berücksichtigung des Teilaufbaus eine signifikante Erleichterung im Logistikprozess aufgrund reduziertem Transport- und Aufbauaufwand. Entsprechende Reporte mit den spezifischen auszuliefernden (Teil-)Mengen können hierzu für die Anweisung der externen Lagermitarbeiter generiert werden.

#### **4.3 Dynamische Reaktion auf die Steiggeschwindigkeit: Einsatzmodalität**

Einen wesentlichen Vorteil bietet die Synchronisation des Logistikprozesses mit der Steiggeschwindigkeit und somit dem Pegelverlauf. Sehr häufig treten Hochwasserverläufe mit einer relativ geringen Steiggeschwindigkeit auf. Steigt also der Rheinpegel langsamer als im derzeit vorliegenden Standard-szenario an, kann mit weniger Einsatzkräften und/oder längeren Aufbauzeiten operiert werden. Dies bietet die Möglichkeit, mit erheblich reduzierter Personalstärke und Geräteanzahl zu arbeiten und damit eine kosteneffiziente Auslastung sicherzustellen. Ebenso können natürlich sehr schnelle Pegelanstiege adäquat abgebildet und besser beherrscht werden.

Die Entscheidungsträger können auf Basis der notwendigen Zeitdauer, der Anzahl des Einsatzequipments sowie der potenziellen Kosten über die Auswahl eines Szenarios entscheiden. Die Abbildung 4 zeigt hierzu eine bei-



spielhafte Übersicht möglicher Szenarien. Die daran anschließende Detailanalyse ermöglicht eine genauere Betrachtung des ausgewählten Prozesses.

1 bis 5 von 5 Einträgen

09.07.2019	10.07.2019	11.07.2019	12.07.2019	13.07.2019	Aktive Arbeitszeit (in Stunden)	Gesamtzeit (in Stunden)	Kapazität LKW (Anzahl)	Kapazität SZ (Anzahl)	Kosten (in Euro)	Ergebnistyp	Ergebnisaktion
	14:4			10:20	92,3	92,3	13	2	####	wenigste LKW	Detailansicht
	06:06			10:20	76,9	76,9	21	2	####	eigene Auswahl	In Auswertung
	06:14			10:20	76,6	76,8	14	4	####	eigene Auswahl	Detailansicht
				10:20	60,3	60,3	20	4	####	niedrigste Kosten	Detailansicht
		02:07		10:20	56,9	56,9	28	6	####	kritischer Pfad	Detailansicht

Abbildung 4: Vorauswahl möglicher Logistik- und Aufbauszenarien

#### 4.4 Transparente Datengrundlage als weiteres Ergebnis

Innerhalb des Entwicklungsprozesses wurde schnell klar, dass die notwendige umfangreiche Aufbereitung der in verschiedenen Quellen vorliegenden Daten die Chance bot, erstmalig alle Daten in einer Datenbank zusammenzuführen. Dadurch wurde als erheblicher Mehrwert für den Anwender eine zentrale digitale Datenbasis geschaffen.

In Zukunft muss so nur noch ein Datenbestand gepflegt werden. Hieraus lassen sich alle benötigten Informationen extrahieren und gezielt den Prozessteilnehmern zur Verfügung stellen. Redundantes Arbeiten und hierdurch möglicherweise entstehende Fehler werden so vermieden.

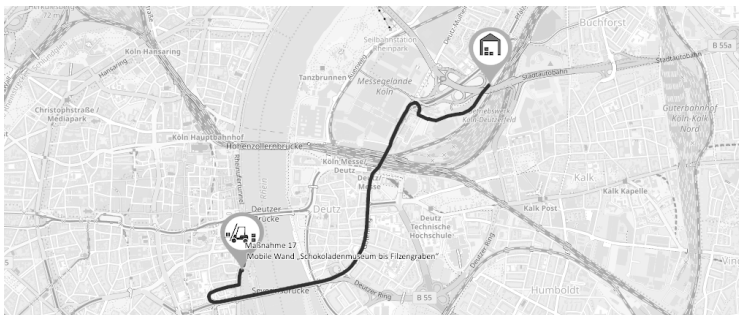


Abbildung 5: Anzeige einer Transportroute vom Lager zur Maßnahme

Die Abbildung 5 zeigt exemplarisch für den stark vereinfachten Informationsabruf die Anzeige einer Route vom Lager zur Hochwasserschutzmaßnahme. Weitere Informationen können bei Bedarf eingeblendet werden. Auch dies erhöht die Transparenz für die beteiligten Dienstleister.

#### 4.5 Sicherheitsgewinn bei Entscheidungen

Durch die kurze Simulationsdauer sind die Entscheidungsträger in der Lage, vorab mehrere alternative Prozesskonstellationen zu prüfen, bevor eine Entscheidung getroffen wird. Diese Funktion ermöglicht es, Handlungsalternativen zu erzeugen, aus denen aufgrund des Erfahrungswissens der Beteiligten eine Alternative ausgewählt werden kann, die auch sicher durchführbar ist.

## 5 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Durch den Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis konnte eine Dynamisierung des Hochwasserschutz-Logistikprozesses erreicht werden. Hierdurch steht den Stadtentwässerungsbetrieben Köln ein derzeit weltweit einzigartiges Simulationstool zur Verfügung, welches in Zukunft eine verbesserte Reaktion auf Hochwasser ermöglichen soll. Das entwickelte agentenbasierte Simulationsmodell konnte hierfür in mehreren Übungen verifiziert und kalibriert werden. Eine Erprobung der Ergebnisse durch ein reales Hochwasser steht noch aus.

Zusammenfassend bietet die Simulation den Entscheidungsträgern eine stark verbesserte Entscheidungsgrundlage, ermöglicht die Dynamisierung und Synchronisation des Logistikprozesses mit einem anstehenden Hochwasser und vermindert durch die zusammengefasste Datenbasis Fehlerquellen.

In der Abbildung des Prozesses hat sich bestätigt, dass die Logistik frühzeitig in der Planung mobiler Systeme berücksichtigt werden muss. Dies fordert auch ein entsprechendes Merkblatt des BWK (2005). Aus Logistiksicht komplexitätstreibende Aufbauten und Sonderprozesse können so möglicherweise verhindert werden.

In Zukunft soll für eine Simulation im laufenden Prozess die Rückmeldung zum Arbeitsstand verbessert werden (Tracking). Auch bietet die geschaffene Datenbasis im Ausblick die Möglichkeit, den operativen Einsatzkräften

digitale einsatzspezifische Arbeitsanweisungen und tätigkeitsgebundene Informationen zur Verfügung zu stellen.

## 6 Literatur

- BWK (2005): Merkblatt. Mobile Hochwasserschutzsysteme. Grundlagen für Planung und Einsatz. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.
- Mewes, B.; Schumann, A. (2019): Das Potential der Kombination von maschinellem Lernen und Agenten-basierter Methoden in der Wasserbewirtschaftung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 63. Jahrgang, Heft 6, Dezember 2019
- Steckel, T., Kersting, T. & Nüßer, W., (2013): Towards Supporting Mobile Business Processes in Non-deterministic Agricultural Environments by Using Agent-Based Technologies. KI - Künstliche Intelligenz: Vol. 27, No. 4. Springer. (S. 359-362).

Autoren:

Dipl.-Ing. Simon Jegelka

Dipl.-Kfm. Patrick Kluding

topocare GmbH  
Gartenstraße 4  
33332 Gütersloh

Stadtentwässerungsbetriebe Köln  
Operativer Hochwasserschutz  
Ostmerheimer Straße 555  
51109 Köln

Tel.: +49 5241 50497 0  
Fax: +49 5241 50497 99  
E-Mail: [s.jegelka@topocare.de](mailto:s.jegelka@topocare.de)

Tel.: +49 221-221-28693  
Fax: +49 221-221-6628693  
E-Mail: [patrick.kluding@steb-koeln.de](mailto:patrick.kluding@steb-koeln.de)

Prof. Dr. Wilhelm Nüßer

Fachhochschule der Wirtschaft FHDW  
Fachbereich Informatik  
Fürstenallee 5  
33102 Paderborn

Tel.: +49 5251 301 135  
Fax: +49 5251 301 188  
E-Mail: [wilhelm.nuesser@fhdw.de](mailto:wilhelm.nuesser@fhdw.de)