

# KORREKTUR VON RADARDATEN UND NUTZEN FÜR DIE BEWIRTSCHAFTUNG DES ENTWÄSSERUNGSSYSTEMS IN HAMBURG

S. Krämer<sup>1,\*</sup>, A. Kuchenbecker<sup>2</sup>, K. Krieger<sup>2</sup>, L. Fuchs<sup>1</sup> und H.-R. Verworn<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für technisch wissenschaftliche Hydrologie GmbH., Engelbosteler Damm 22, D-30167 Hannover

<sup>2</sup> Hamburger Stadtentwässerung AöR Unternehmen von HAMBURG WASSER, Billhorner Deich 2 D-20539 Hamburg

<sup>3</sup> Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9, D-30167 Hannover

\*Email des korrespondierenden Autors: s.kraemer@itwh.de

**Kurzfassung** Der Regen ist die maßgebende Belastungsgröße für städtische Entwässerungssysteme. Die Erfassung des Regengeschehens durch Radar hat gegenüber der Regenschreibermessung den Vorteil, dass Aussagen zur räumlichen Verteilung des Regens im Einzugsgebiet getroffen werden können; zudem ist eine Regenvorhersage möglich. Der Beitrag beschreibt ein Konzept zur Korrektur und den Einsatz von Radardaten für Aufgaben in der Stadtentwässerung und zeigt den Mehrwert von Radardaten am Beispiel der Ungleichmäßigkeit der Überregnung im Stadtgebiet Hamburgs.

*Schlagwörter:* Entwässerungssystem, Radar, Regen

## 1 EINLEITUNG

Der Regen ist die maßgebende Belastungsgröße für städtische Entwässerungssysteme. Aufgrund der hohen Befestigungsgrade der angeschlossenen Flächen besitzen diese Systeme eine ausgeprägte Niederschlag-Abflusssdynamik. Die Belastungsgröße Regen wird in der Regel jedoch durch Regenschreiber erfasst. Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Regen eine homogene Belastungsgröße ist und räumlich extrapoliert werden kann. Entgegen dieser vereinfachenden Annahme ist das natürliche Regengeschehen dynamisch; der Regenprozess ist durch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Intensität in Abhängigkeit vom Ereignischarakter gekennzeichnet. Dieser Effekt der ungleichmäßigen Überregnung hat Einfluss auf die Planung und Bewirtschaftung von Entwässerungssystemen (Schilling 1984) sowie deren Nachweis (Ziegler et al 2005). Die Anforderungen an die zeitliche und räumliche Information zum Regengeschehen sind bekannt und betragen zeitlich  $\leq 5$  min und räumlich  $\leq 1$  km. (Schilling, 1991, Berne et al. 2004).

Radardaten erfüllen diese Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung von Regeninformationen. Es ist das Ziel der Hamburger Stadtentwässerung durch den Einsatz von Radardaten den Einfluss der ungleichmäßigen Überregnung und die Möglichkeit zur Vorhersage des Regengeschehens für eine optimierte Planung und Bewirtschaftung des Entwässerungssystems zu nutzen. Dadurch soll auch dem Einfluss des prognostizierten Klimawandels entgegengewirkt werden, der die in den vergangenen Jahrzehnten erreichten Ziele im Gewässerschutz zu kompensieren droht (Kuchenbecker et al. 2010). Darüber hinaus dient die Regenvorhersage dem Katastrophen- und Überflutungsschutz sowie der Unterstützung betrieblicher Aufgaben im Kanalnetz. Der Beitrag erläutert das Konzept zur Korrektur und Bereitstellung von Radardaten.

## 2 KONZEPT

Das Konzept zur operationellen Nutzung der Radardaten in Echt-Zeit erfordert mehrere aufeinander folgende Prozessschritte, die mit der Bereitstellung einer neuen Radardatei wiederholend ausgelöst werden. Zunächst werden die Radardaten (DX-Produkt, vgl. Abschnitt 2.1) vom Server des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit Hilfe des ftp-Protokolls übertragen. Es folgt mit dem Programm ZTOR eine Korrektur der physikalischen Einflüsse aus dem Regengeschehen, die in den Radardaten enthalten sind (Abschnitt 3). Das Ergebnis sind korrigierte Radardaten, die die Zielgröße Regenhöhe / Zeitschritt [mm] enthalten. Die Daten werden georeferenziert im kartesischen ArcGIS® Rasterformat bereitgestellt. Das Format ist Grundlage für die Regenvorhersage mit dem Modell HYRATRAC, Regenbelastung für das Nie-

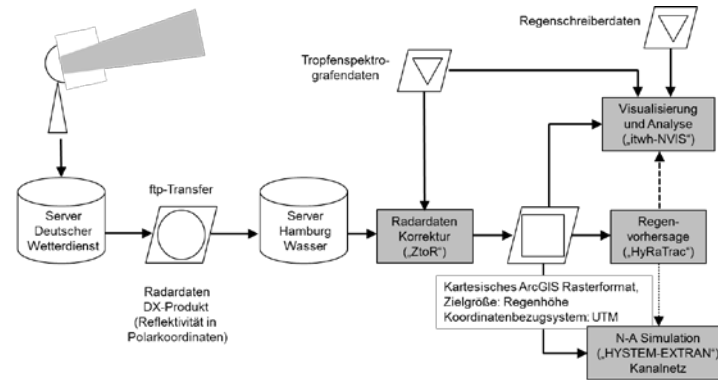


Abbildung 1: Datenflüsse und Software zur Korrektur, Vorhersage und Visualisierung von Radardaten

derschlag-Abfluss Modell HYSTEM EXTRAN sowie für die Visualisierung und Analyse des Regengeschehens in ArcGIS® mit der Extension itwh-NVIS. Zur Unterstützung des Netzbetriebes kann das Regengeschehen mit NVIS als animierte Radarbildfolge in Echt-Zeit und für historische Ereignisse dargestellt werden. Radarregenstärken können für beliebige Gebiete als Zeitreihendiagramme analysiert werden.

## 2.1 Radardaten

C-Band Radardaten werden durch den DWD als unkorrigierte „Rohdaten“ (DX-Produkt) für den Standort Hamburg bereitgestellt. Die Daten liegen in Polarkoordinaten vor (azimutale Auflösung: 1,0°; Feldlänge: 1,0 km; radiale Reichweite (Felder): 128 km). Sie enthalten die gemessene Radarreflektivität [dBZ], die in 128 Klassen diskretisiert ist. Die zeitliche Auflösung beträgt  $\Delta t = 5$  Minuten.

## 3 RADARDATENKORREKTUR

Das Ziel der Radardatenkorrektur ist, die gemessene Radarreflektivität  $Z$  [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ] in die Zielgröße Regenintensität [ $\text{mm}/\text{h}$ ] umzuwandeln. Verschiedene Einflüsse wirken auf die Radarmessung (Villarini und Krajewski, 2010), so dass die Verwendung der Daten ohne Korrektur als Regenbelastung für die weitere Nutzung in der Stadtentwässerung nicht geeignet ist. Einflüsse auf die Radarmessung, die mit dem Programm ZTOR korrigiert werden, sind:

1. Störechos
2. Dämpfung des Radarsignals durch Regen
3. Umrechnung der Radarreflektivität in die Regenintensität (R-Z Beziehung).

### 3.1 Störechos

Häufige Formen von Störechos sind Reflektionen des Radarsignals an Oberflächen (z.B. Gebäude) und Signalabschattungen durch Hindernisse (z.B. Türme, Berge). Störechos dieser Art sind im Radarbild räumlich konstant. Eine weitere Ursache von Störechos sind atmosphärische Einflüsse. Störechos dieser Art sind räumlich variabel. Die Behandlung von Störechos in den Radardaten mit ZTOR erfolgt durch Musterkennungsverfahren und Korrektur in Abhängigkeit der Art des Störechos.

### 3.2 Dämpfung

Durchdringt ein Radarsignal eine Regenwolke, so wird das Signal an den einzelnen Regentropfen abgelenkt und absorbiert (Abbildung 2). Der zum Radar reflektierte Energieanteil des Signals wird als Reflektivität  $Z$  gemessen. Diese Streuprozesse des Radarsignals sind abhängig von der Radarfrequenz sowie von den ereignisspezifischen Eigenschaften des Tropfenvolumens (Tropfenanzahl, -größe, -form und -temperatur). Mit zunehmender Durchdringung der Regenwolke nimmt der gestreute und absorbierte Energieanteil von der Ausgangssignalstärke zu, das Signal wird gedämpft. Dadurch werden Tropfenvolumen in unterschiedlichen Entfernungen ( $r_1$ ;  $r_2$ ) mit einer unterschiedlichen Signalstärke beaufschlagt, so dass die gemessenen Regenintensitäten nicht vergleichbar sind. Dieser skizzierte Dämpfungseffekt ist die Ursache für die Unterschätzung der Radarregenintensität mit zunehmender Entfernung vom Radarstandort. Für C-Band Radare ist signifikante Dämpfung für Reflektivität  $> 40$  dBZ zu erwarten, die für konvek-

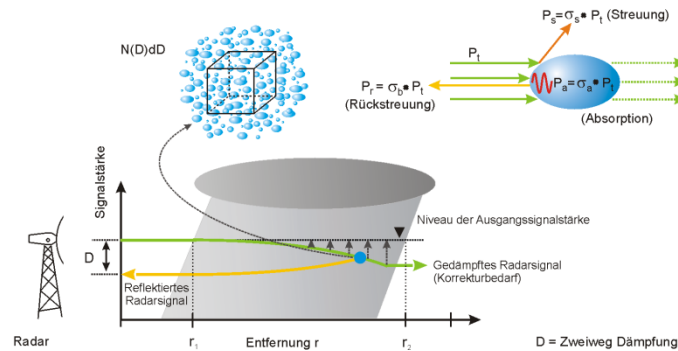


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Radarmessung, Streuprozesse und Dämpfung

tive Regenprozesse charakteristisch ist. Signaldämpfung von 3 dB – 9 dB ist bei konvektiven Ereignissen häufig zu erwarten (Krämer et al, 2012). Ein Wert von 3 dB beschreibt eine Halbierung der Reflektivität. Eine Korrektur von Signaldämpfung wird in der operationellen Bereitstellung von Radardaten durch Wetterdienste nicht durchgeführt (Harrison et al. 2010). Lediglich der britische MetOffice führt eine Korrektur nach dem Schema von Hitschfeld und Bordan (1954) durch (Harrison et al. 2010). Dieses Schema beinhaltet eine feldweise Berechnung der Dämpfung und Korrektur des Reflektivitätsprofils. Der für die Korrektur erforderliche Zusammenhang zur Berechnung der Dämpfung aus der Reflektivität wird durch Dämpfungskoeffizienten beschrieben, die von den Streueigenschaften des Tropfenvolumens abhängig sind. Da das räumliche Regengeschehen heterogen ist und unterschiedliche Regenprozesse (konvektiv, stratiform) sind, führt die übliche Verwendung konstanter Koeffizienten häufig zu Instabilität und Abbruch der Dämpfungskorrektur (Harrison et al. 2010). In ZTOR werden daher variable Koeffizienten verwendet, die in Abhängigkeit des aktuellen Regenprozesses eine stabile Dämpfungskorrektur erzielen (Rahimi et al. 2006; Krämer et al. 2009). Abbildung 3 illustriert den Einfluss der Dämpfungskorrektur am Beispiel eines konvektiven Ereignisses. Durch die strahlweise Dämpfungskorrektur erfolgt eine räumlich differenzierte Erhöhung der Reflektivität in radialer Richtung für Bereiche intensiver Zellstrukturen.

### 3.3 Umrechnung von Radarreflektivität in Regenintensität (R-Z Beziehung)

Die Umrechnung der Radarreflektivität (Z) in die Zielgröße Regenintensität (R) erfolgt mit Hilfe von am Boden gemessenen Tropfengrößenverteilungen. Aus der Tropfengrößenverteilung werden die R- und Z-Werte des Regenprozesses berechnet. Durch Regressionsrechnung wird der Zusammenhang zwischen den Messgrößen beschrieben (R-Z Beziehung). Unter der Annahme, dass die auf Basis der am Boden gemessenen Tropfengrößenverteilungen ermittelte R-Z Beziehung auch für die Radarmessung in der Höhe gültig ist, kann die Regenintensität aus den Radardaten berechnet werden. Abbildung 4 zeigt R-Z Beziehungen für unterschiedliche Regenprozesse. Charakteristisch ist der exponentielle Verlauf mit zunehmender Reflektivität. Zu beachten ist, dass stratiforme Regenprozesse in der Regel auf Reflektivität < 40 dBZ begrenzt sind. Die Grenzen beschreiben beobachtete R- und Z-Werte eines Einjahreskontinuums, die die Bandbreite von R-Z Beziehungen für verschiedene Regenprozesse umfassen. Abbildung 4 verdeutlicht zudem den Einfluss der Dämpfungskorrektur: bei einer Korrektur um 3 dB (48 auf 51 dBZ) erhöht sich die Regenintensität für die konvektive R-Z Beziehung um 70 % von 39 mm/h auf 66 mm/h.

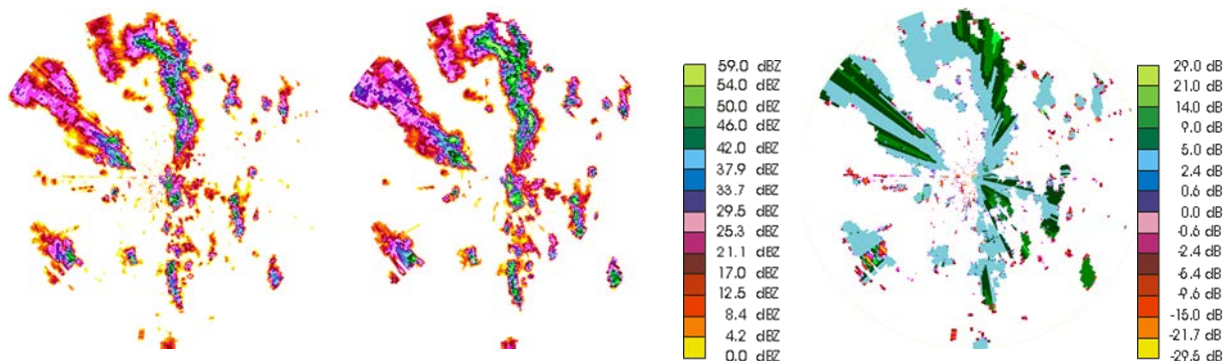


Abbildung 3: PPI der Radarstandortes Hamburg-Fuhlsbüttel, 6. Juni 2011, 14:45 UTC, links: DX unkorrigiert, mittig: DX mit Störechobehandlung und Dämpfungskorrektur, rechts: korrigierte Dämpfung

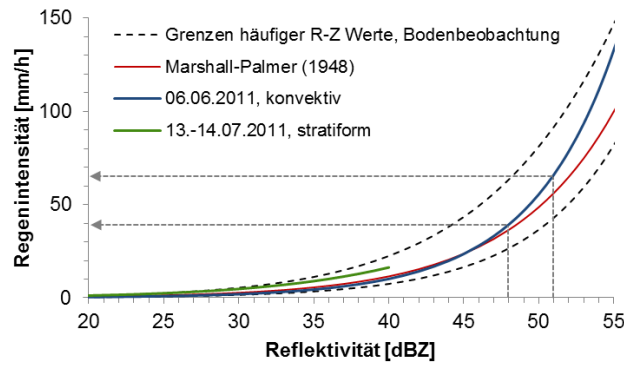


Abbildung 4: R-Z Beziehungen

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 Radardatenkorrektur

Für die Verifikation der implementierten Korrekturschritte werden die Ergebnisse mit 13 Regenschreiberbeobachtungen im Stadtgebiet Hamburgs beispielhaft für das konvektive Regenereignis vom 6. Juni 2011 (Dauer ca. 1,5 Stunden) analysiert, welches im Stadtgebiet lokal begrenzt erhebliche Überflutungen verursacht hat. Abbildung 5a zeigt den Vergleich von Radar- und Regenschreiberhöhen für die 13 Stationen. Ohne Korrektur der Radardaten ist eine Unterschätzung der Radarregenhöhen festzustellen; die Steigung der Regression beträgt  $y = 0,34$ . Mit Korrektur wird eine systematische Erhöhung der Radarregenhöhen erzielt. Die Wertepaare zeigen eine deutlich verbesserte Konzentration entlang der 1-1 Geraden. Die Steigung der Regression beträgt  $y = 0,91$  und beschreibt im Mittel eine Unterschätzung in der Größenordnung von 10 %. Die Korrektur spiegelt sich ebenfalls in der zeitlichen Betrachtung der Radar- und Regenschreiberhöhen wider. Der Radarregen mit Korrektur zeigt eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung mit der Beobachtung der Regenschreiberstation R034. Die gute Übereinstimmung wird im Wesentlichen durch Dämpfungskorrekturen der Reflektivität  $Z$  in Größenordnungen bis 8 dB erreicht.

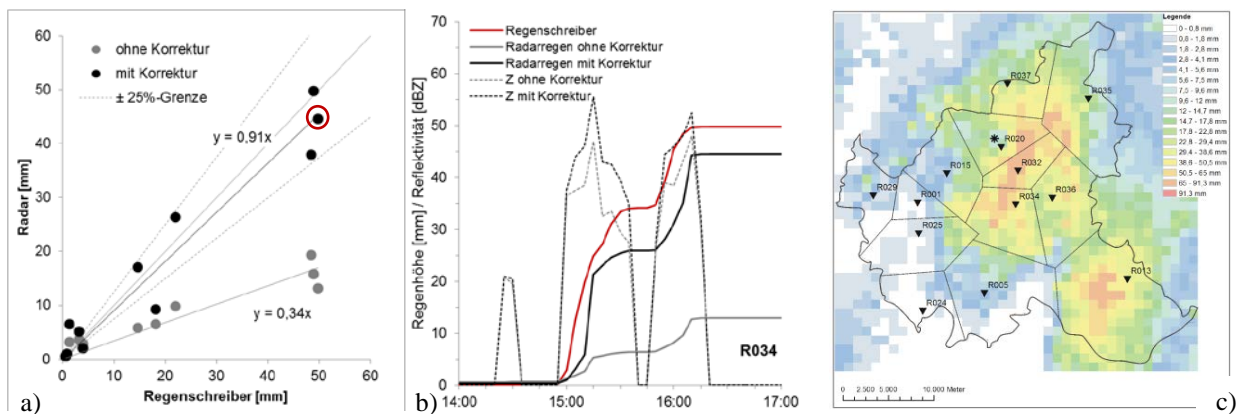


Abbildung 5: Ereignis 06.06.2011, a) Verifikation: Radar-Regenschreibervergleich; b) Radar- u. Regenschreiberhöhen Station R034; c) kumulierte Regenhöhen und Thiessen-Flächen der Regenschreiber (schwarze Dreiecke)

### 4.2 Ungleichmäßigkeit der Überregnung

Ein Vorteil der Radar- gegenüber der Regenschreibermessung ist die räumliche Erfassung des Regengehens. Um diesen Mehrwert quantifizieren zu können, wird eine Abschätzung zur Ungleichmäßigkeit der Überregnung durchgeführt. Auf Grundlage eines Rasters von 746 Elementen im Stadtgebiet Hamburgs (Kantenlänge: 1,0 km) wird der korrigierte Radarregen ( $R_{\text{Radar}}$ ) mit den Regenschreiberbeobachtungen ( $R_{\text{RS}}$ ) verglichen. Die Extrapolation von  $R_{\text{RS}}$  auf die Rasterelemente erfolgt auf Grundlage einer Thiessen-Zuordnung (Abbildung 5c). Es wird die Annahme getroffen, dass  $R_{\text{Radar}}$  als Referenz verwendet werden kann. Je Rasterelement wird der absolute Fehler berechnet und in Fehlerklassen eingeteilt.

$$\text{Fehler} = \frac{\text{abs}(R_{\text{Radar}} - R_{\text{RS}})}{R_{\text{Radar}}} \times 100 \quad \text{in [\%]} \quad (1)$$

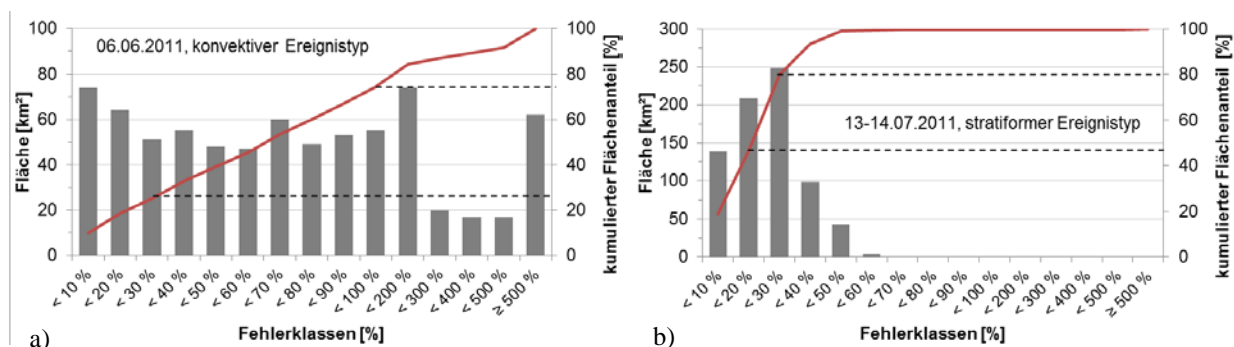


Abbildung 6: Fehler aus Regenschreiberextrapolation (R<sub>RS</sub>) bei Verwendung des Thiessen-Verfahrens

Abbildung 6a zeigt die Verteilung der Fehlerklassen. Für das konvektive Ereignis ist für ca. 25 % der Gesamtfläche Hamburgs (746 km<sup>2</sup>) ein Fehler bis 30 % in der Thiessen-Extrapolation von R<sub>RS</sub> festzustellen. Bis zu einem Fehler von 100 % steigt der Flächenanteil auf 75 %; d.h. für 25 % der Fläche beträgt der Extrapolationsfehler von R<sub>RS</sub> mehr als 100 %. Im Vergleich zum konvektiven Ereignis sind in Abbildung 6b die Ergebnisse eines stratiformen Ereignis dargestellt, bei dem durch die Korrektur eine Regression der Wertepaare des Radar-Regenschreibervergleichs von  $y = 0,95$  erzielt worden ist. Dabei lagen die Radarregenhöhen innerhalb einer Bandbreite von 15% Über- bzw. Unterschätzung der Regenschreiberbeobachtungen. Der Extrapolationsfehler R<sub>RS</sub> ist aufgrund des gleichmäßigen Ereignischarakters geringer. Für etwa 45 % der Stadtfläche beträgt der Fehler weniger als 20 %, für 80 % der Fläche weniger als 30 %.

## 5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Voraussetzung für die Nutzung von Radardaten in der Stadtentwässerung ist die Korrektur der physikalischen Einflüsse auf die Radarmessung. Die Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Eignung des Korrekturkonzeptes. Im Rahmen der Bewertung und Nutzung von Radardaten ist die verbleibende Unsicherheit in der erzielten Radardatenkorrektur dem Gewinn an räumlicher Information zur Regenverteilung im Entwässerungssystem gegenüber zu stellen. Bei konvektiven und stratiformen Ereignissen ist zu erwarten, dass die Unsicherheitsbandbreite in der Korrektur geringer ist, als der resultierende Fehler aus der räumlichen Extrapolation der Regenschreibermessung. Der Mehrwert von Radardaten steigt mit der Größe des Entwässerungssystems. Durch die operationelle Einbindung der Regenradardaten erschließen sich die Hamburger Stadtentwässerung neue ökonomische und ökologische Potentiale für die Planung und Bewirtschaftung des Entwässerungssystems mit einhergehender Optimierung des Katastrophenschutzes.

## 6 REFERENZEN

- Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J. and Obled, C., (2004): Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *J. Hydrol.* 299, 166–179.
- Harrison D.L., Hafner S., Peura, M., Dupuy, P. and Boscacci M. (2010): Radar data quality management in operational environments. 6<sup>th</sup>, Europ. Conf. on Radar Meteorology and Hydrology, Sibiu, Romania.
- Hitschfeld W., Bordan J. (1948): Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelength, *J. Meteor.* 11, 58 – 67.
- Krämer S., Verworn H.-R., Treis A., Pfister A., Becker M. (2009): Korrektur von C-Band-Radardaten für die Niederschlag-Abfluss Modellierung - Grundlagen, Algorithmen und Verifikation. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 2 (9), 479 – 486.
- Krämer S., Verworn H.-R., Treis, A., Pfister A. (2012): Streckenintegrierte Regenmessung mit dem Mikrowellendämpfungs-differenzverfahren und Quantifizierung von Radarsignaldämpfung, *Hydrologie und Wasserwirtschaft*, 56 (2), 59–77.
- Kuchenbecker A., Bischoff G., Ziegler J., Krieger K., Verworn H.-R. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf das Hamburger Kanalnetz, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 57(9), 874 – 881.
- Rahimi A.R., Holt A.R., Upton G.J., Krämer S., Redder A., Verworn H.-R. (2006): Attenuation calibration of an X-band weather radar using a microwave link. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23 (3) 395 – 405.
- Schilling W. (1984): Effect of spatial rainfall distribution on sewer flows. *Wat. Sci. Tech.* 16, 177 – 188.
- Schilling W. (1991): Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmos. Res.*, 27, 5 – 21.
- Villarini G., Krajewski W.F. (2010): Review of the different sources of uncertainty in single polarisation radar-based estimates of rainfall. *Surv. Geophys.* 31, 107 – 129.
- Ziegler J., Krämer S., Verworn H.-R. (2005): Langzeitsimulation mit Radardaten, *KA Abwasser Abfall*, 53 (11), 1123 – 1129.