

Prognosen jahreszeitabhängiger Grundwasseraufhöhungen infolge alternativer Fremdwasserreduktionsmaßnahmen

Rolf Becker, Jörg Kögel, Christoph Langweg (Hamm), Christian Kölling und Christian Tomsu (Geretsried)

Zusammenfassung

Die Stadtentwässerung Hamm strebt an, im Stadtteil Hamm-Bockum-Hövel die großen und stark jahreszeitabhängigen Fremdwasserzuflüsse in ihr undichtes Kanalnetz durch Kanalabdichtungen zu senken. Die dadurch bewirkten Grundwasseraufhöhungen müssen durch geeignete Ausgleichsmaßnahmen limitiert werden, um in diesem dicht bebauten Stadtteil großflächige Vernässungen und Bauschäden zu vermeiden. Im Auftrag der Stadtentwässerung Hamm erstellte das Ingenieurbüro Isar Consult das instationär gekoppelte Wasserhaushalts- und 3D-Grundwassermodell Hamm-Bockum-Hövel, mit dessen Hilfe die geohydraulischen Auswirkungen alternativer Kanalabdichtungs- und Ausgleichsmaßnahmen haltungsscharf prognostiziert und diese Maßnahmen darauf aufbauend systematisch optimiert wurden.

Schlagwörter: Entwässerungssysteme, Fremdwasser, Grundwasser, Grundwasserneubildung, Modell, Kanalisation, undicht, Prognose

DOI: 10.3242/kae2009.03.002

Abstract

Forecasting Seasonal Rises in Groundwater Levels Due to Alternative Sewer Infiltration Water Measures

The Hamm Urban Drainage Company intends to reduce the heavy seasonal flows of sewer infiltration water into its leaking sewer network in the Hamm-Bockum-Hoevel district by sewer sealing measures. The rise in groundwater levels, which will be caused by these measures, must be limited through appropriate compensatory measures in order to avoid large-scale water logging and structural damage in this densely populated quarter. On behalf of the Hamm Urban Drainage Company, an engineering firm developed the Hamm-Bockum-Hoevel water balance and 3D groundwater model, which is used to predict the geohydraulic effects of alternative sewer sealing and compensatory measures for each sewer section and to systematically optimise these measures on the basis of this model.

Key words: drainage systems, sewer infiltration water, groundwater, groundwater regeneration, model, sewer system, leaky, forecast

1 Geplante Fremdwasserreduktionsmaßnahmen

In Bockum-Hövel betreibt die Stadtentwässerung Hamm (SH) ein 51 km langes Mischwasserkanalnetz, dessen Hauptsammler in der zentralen Flussrinne des ehemaligen Eversbaches errichtet wurde, der ursprünglich die natürliche Grundwasservorflut bildete. Im Zuge der Kanalisierung wurde der Eversbach fast vollständig verrohrt, so dass sein Abfluss heute überwiegend unterirdisch in der vorhandenen Kanalisation abfließt.

Die erheblichen Kanalundichtigkeiten (Abbildung 1) bewirken einen durch stark erhöhte Trockenwetterzuflüsse zur Kläranlage Hamm-West belegten erhöhten grundwasserbürtigen Fremdwasseranteil [1]. Die unzulässigen Grundwassereinleitungen in die Kanalisation [1] verursachen erhöhte Betriebs- und Investitionskosten sowie erhöhte Abwassergebühren. Daher strebt die Stadtentwässerung Hamm an, Grundwasserzutritte in die Kanalisation durch Kanalabdichtungen stark zu reduzieren. Dadurch wird die derzeit vorherrschende Grundwasservorflut jedoch systematisch vermindert, so dass im dicht bebauten Stadtteil Hamm-Bockum-Hövel großflächige Grundwasseranstiege



Abb. 1: Grundwasserzutritt in das undichte Kanalnetz
Foto: www.hausanschluss.ch

mit zeitweisen Oberflächenüberflutungen zu erwarten sind, sofern diese nicht durch geeignete Ausgleichsmaßnahmen verhindert werden.

Um derartige Planungsfehler zu vermeiden, erstellte das Ingenieurbüro Isar Consult im Auftrag der SH das Grundwassermodell Hamm-Bockum-Hövel [2], das es erlaubt, die großen und sehr stark jahreszeitabhängigen grundwasserbürtigen Fremdwasserzuflüsse in die Kanalisation für den Ist-Zustand und für alternative Kanalabdichtungs- und Ausgleichsmaßnahmen haltungsscharf in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu simulieren und darauf aufbauend diese Maßnahmen zu optimieren.

2 Einjähriges Durchfluss- und Grundwassermessprogramm

Das Grundwassermodell wurde aufgrund eines kombinierten Durchfluss- und Grundwassermessprogramms [3, 4] kalibriert, das von der Isar Consult GmbH zuvor im Auftrag der SH konzipiert, ausgeführt und ausgewertet worden war. Hierzu wurden 36 vorhandene Grundwassermessstellen mit digitalen Grundwasserdatensammlern und 13 Hauptsammler mit mobilen Ultraschall-Durchflussmessanlagen ausgerüstet, mit deren Hilfe über einen Zeitraum von 13 Monaten die Grundwasserstände in Intervallen von 15 Minuten und die Kanalabflüsse in Intervallen von fünf Minuten gemessen und digital aufgezeichnet wurden [3, 4]. Abbildung 2 zeigt die Lage der Messstellen.

3 Schlussfolgerungen

Die in [3] und [4] räumlich und zeitlich hoch aufgelöst dokumentierten Messergebnisse zeigen stark jahreszeitabhängige Grundwasserstände und Fremdwasserzutritte in die Kanalisation, die stark miteinander korrelieren. Da das Kanalnetz überwiegend oberhalb der minimal, aber unterhalb der maximal gemessenen Grundwasserniveaus liegt [4], sind große Teile des Hammer Kanalnetzes bei niedrigen und mittleren Grundwasserständen nicht, bei hohen Grundwasserständen dagegen stark vorflutwirksam. Die Durchflussmessergebnisse [3] belegen, dass die ursprüngliche Grundwasservorflutwirkung des Eversbaches heute ganz überwiegend durch die undichte Mischwasserkanalisation ausgeübt wird.

Die örtliche Verteilung der grundwasserbürtigen Fremdwasserzutritte hängt stark von der Dichtheit, den Sohlhöhen und den Kanalwasserständen der einzelnen Kanalhaltungen sowie von den entlang der undichten Kanalhaltungen vorherrschenden Grundwasserständen ab. Diese maßgebenden Einflüsse wurden mithilfe eines räumlich hoch auflösenden dreidimensionalen Grundwassermodells haltungsscharf erfasst.

In dem in Abbildung 2 dargestellten Modellgebiet fallen im Sommer nur 76 l/(E × d) Fremdwasser an, während im Winter mit 492 l/(E × d) mehr als die sechsfachen Fremdwasser-

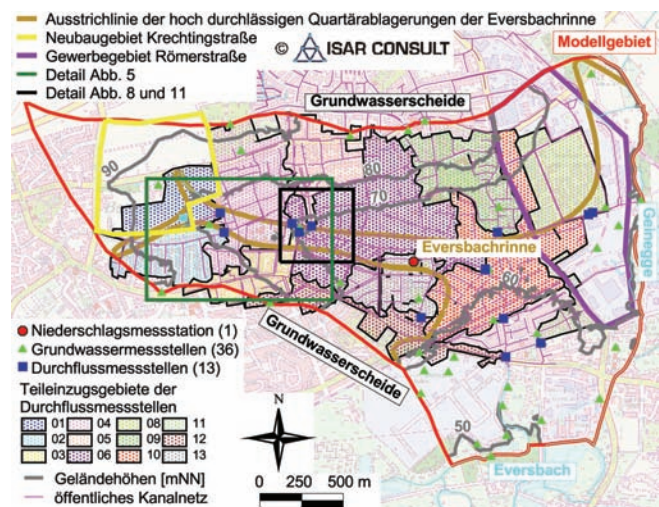


Abb. 2: Modellgebiet mit Geländehöhen, Ausstrichlinie der hoch durchlässigen Quartärablagerungen der Eversbachrinne, bestehendem Kanalnetz, Messstellenübersicht und Teil Einzugsgebiete der Durchflussmessstellen

zutritte in die Kanalisation auftreten [3], die mit den im Winter systematisch erhöhten Grundwasserständen gut korrelieren [4]. Daher waren vereinfachende stationäre Simulationen mittlerer Grundwasserhältnisse nicht sinnvoll, denn die mittleren Grundwasserhältnissen entsprechenden grundwasserbürtigen Fremdwasserzutritte repräsentieren keineswegs die erheblich größeren Mittelwerte der grundwasserbürtigen Fremdwasserzutritte [3], die für die erhöhten Kläranlagenzuflüsse maßgebend sind. Die stark jahreszeitabhängigen Fremdwasserzutritte und Grundwasserstände resultieren unmittelbar aus den sehr stark jahreszeitabhängigen Grundwasserneubildungen. Daher wurde allen Modellprognosen ein instationärer Modellansatz mit einer Zeitschrittweite von nur einem Tag zugrunde gelegt.

4 Jahreszeitabhängige Grundwasserneubildung

Vor allem aufgrund der stark temperaturabhängigen Verdunstung tragen Niederschläge nur teilweise zur Grundwasserneubildung bei. Außerdem können in der durchwurzelten Bodenzone große Wassermengen zwischengespeichert werden, so dass vor allem Sommerniederschläge nur stark vermindert, gedämpft und verzögert zur Grundwasserneubildung beitragen. In Hamm können auf grundwassernahen land- und forstwirtschaftlichen Nutzflächen in niederschlagsarmen warmen Sommern Grundwasserneubildungen auch völlig ausbleiben oder infolge von Kapillaraufstieg negativ werden. Dies ist bei der Bebauung derartiger Nutzflächen zu beachten, durch die der vorhandene Pflanzenbestand und damit auch die Verdunstung vermindert werden. Sofern der auf den versiegelten Flächen anfallende Oberflächenab-

fluss nicht über die Kanalisation oder vorhandene Oberflächen-gewässer abgeleitet wird, können sich für diese Neubaugebiete systematisch erhöhte Grundwasserneubildungen ergeben.

Dies ist für gering durchlässige gewässerferne Standorte besonders kritisch, wenn die Grundwasserneubildungen durch Regenwasserversickerungen systematisch erhöht werden, wie dies ursprünglich auch für das 43 ha große Neubaugebiet Krecktingstraße (vgl. Abbildung 2) geplant war. Diese ursprünglich geplanten Regenwasserversickerungen wurden jedoch aufgrund der dadurch bewirkten stark erhöhten Grundwasserneubildungen und der für das geplante Neubaugebiet und dessen Umgebung resultierenden erheblichen Grundwasserantriege und Oberflächenvernässungen verworfen.

Die zeitlich und räumlich stark variierenden Grundwasserneubildungen hängen maßgeblich von den aktuellen Grundwasserflurabständen und damit von den zeitlich und räumlich stark variierenden Grundwasserständen ab, die mithilfe des Grundwassermodells in Abhängigkeit von den aktuellen Grundwasserneubildungen für das gesamte Modellgebiet instationär simuliert werden. Da sich Grundwasserneubildungen und Grundwasserstände gegenseitig beeinflussen, wurden sie nicht unabhängig voneinander, sondern simultan und in ständiger gegenseitiger Rückkopplung simuliert [2].

5 Wasserhaushaltsmodell SIMG

Daher wurde das 3D-Grundwassermodell Hamm-Bockum-Hövel [2] instationär mit dem Wasserhaushaltsmodell SIMG [5] gekoppelt, in dem alle die Grundwasserneubildung maßgeblich beeinflussenden Komponenten des Wasserhaushalts und des Bodenwasserspeichers gemäß Merkblatt ATV-DVWK-M 504 [6] implementiert wurden. Die in [2] und [5] beschriebene instationäre Modellkopplung erlaubt es, in jedem Zeitschritt der instationären Simulation die Grundwasserneubildungen und Grundwasserstände unter Beachtung ihrer gegenseitigen Einflüsse flächendeckend zu simulieren.

Abbildung 3 fasst wichtige Eingangsdaten und Hauptkomponenten des Wasserhaushaltsmodells SIMG [5] schematisch zusammen. Charakteristische Witterungsverhältnisse repräsentierende Tageswerte der Niederschlagssummen, Lufttemperaturen,

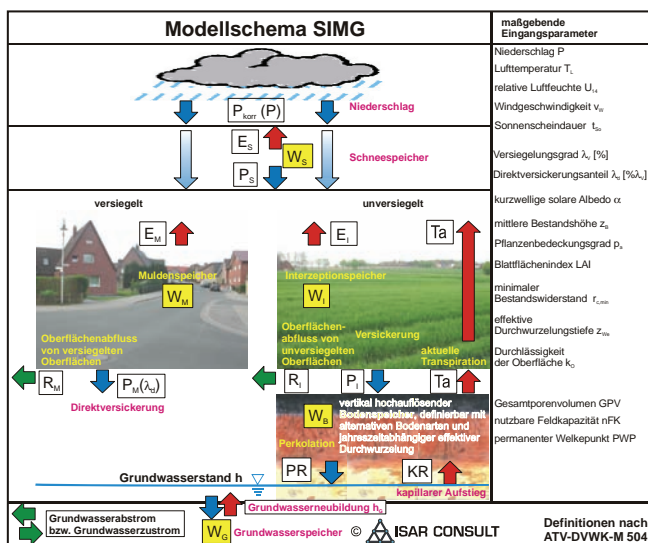


Abb. 3: Eingangsdaten und Hauptkomponenten des Wasserhaushaltsmodells SIMG

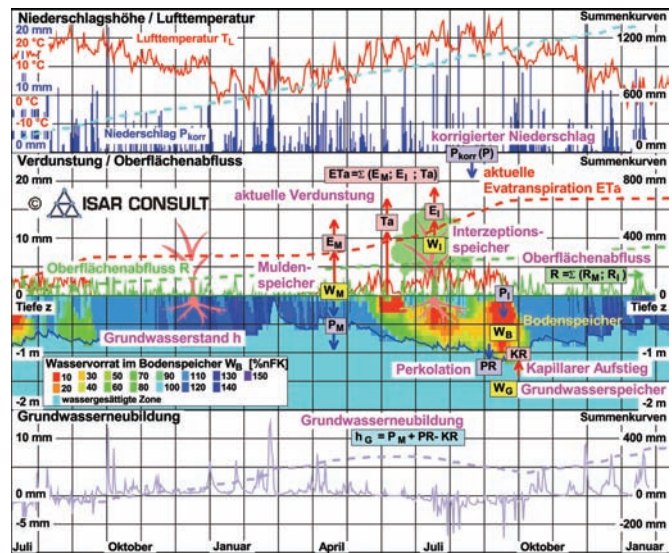


Abb. 4: Für eine typische Hammer Wohnbebauung mittels SIMG simulierte Zeitreihen und Summenlinien maßgebender Wasserhaushaltskomponenten

relativen Luftfeuchten, Windgeschwindigkeiten und Globalstrahlungen wurden historischen Aufzeichnungen entnommen. Standortsspezifische Eingangsdaten zu Versiegelungsgraden, Landnutzungen und vielfach jahreszeitabhängigen Bestandshöhen, Bedeckungsgraden, Blattflächenindizes und Durchwurzelungstiefen der Pflanzen wurden aktuellen Luftbildern entnommen und geplanten Nutzungsänderungen angepasst. Außerdem wurden verfügbare Angaben zu vorhandenen oder geplanten Baugebieten mit und ohne Regenwasserversickerung und zum örtlichen Deckschichtenaufbau berücksichtigt.

Das Wasserhaushaltsmodell SIMG liefert für vorgegebene Eingangsdaten zeitlich und räumlich hoch auflösende Prognosen der flächendeckenden Verteilungen

- der Transpiration und Interzeptionsverdunstung,
- der Evaporation,
- des Oberflächenabflusses,
- der Bodenspeicherzuckerung,
- der Direktversickerung,
- des Kapillaraufstiegs und
- der Grundwasserneubildung

sowie der aktuellen Wasserinhalte

- des Muldenspeichers versiegelter Oberflächen,
- des Interzeptionspeichers unversiegelter Oberflächen,
- des auch vertikal hoch aufgelösten Speichers der durchwurzelten Bodenzone.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch für eine zu λ_v = 42 % versiegelte und durch geringe Grundwasserflurabstände von f(h) ≤ 1 m gekennzeichnete typische Hammer Wohnbebauung für die dargestellte Niederschlags- und Temperaturganglinie und weitere nicht dargestellte Eingangsparameter die mittels SIMG simulierten Gang- und Summenlinien der Verdunstung, des Oberflächenabflusses, des vertikal hoch aufgelösten Bodenspeichers und der Grundwasserneubildung [2].

Für den grundwassernahen Standort ergeben sich für die Zeit von Juli bis Oktober trotz großer Niederschläge negative

Grundwasserneubildungen. Diese sind auf den hochsommerlich erhöhten Pflanzenwasserbedarf zurückzuführen, der aufgrund der stark erhöhten Verdunstung aus dem jahreszeitbedingt oberflächennah nahezu ausgetrockneten Bodenwasservorrat nicht vollständig gedeckt werden kann und deshalb den in Abbildung 4 deutlich erkennbaren Kapillaraufstieg und die daraus resultierende negative Grundwasserneubildung bewirkt. Infolge der herbstlichen Temperaturabnahme können die großen Herbstniederschläge gemäß Abbildung 4 nicht mehr verdunsten, sondern sie füllen zunächst den zum Ende der Vegetationsperiode stark ausgetrockneten Bodenspeicher auf und tragen anschließend zur Grundwasserneubildung bei. Diese findet in Hamm überwiegend im Winter statt und verursacht die typischen winterlichen Grundwasseranstiege, aus denen im Frühjahr besonders hohe Scheitelgrundwasserstände und stark erhöhte grundwasserbürtige Fremdwasserzuflüsse in das undichte Kanalnetz resultieren, die bis zum Herbst wieder weitgehend verschwinden.

6 Neubaugebiete mit Regenwasserversickerung

Gemäß Abbildung 4 ergibt sich für den nur zu $\lambda_v = 42\%$ versiegelten Standort ein vegetationsunabhängiger und daher ganzjährig relativ konstanter Oberflächenabfluss, dessen Jahressumme die der Grundwasserneubildung übersteigt. Sofern dieser Oberflächenabfluss nicht über die Kanalisation oder vorhandene Oberflächengewässer abgeleitet, sondern mittels Regenwasserversickerung in den örtlichen Grundwasserleiter eingeleitet wird, resultiert daraus eine Verdopplung der Grundwasserneubildung.

Somit kann die lokale Grundwasserneubildung durch Umwandlung land- oder forstwirtschaftlicher Nutzflächen in Neubaugebiete erheblich gesteigert werden. Auf gering durchlässigen gewässerfernen Sand- und Lehmböden können die in Neubaugebieten durch Regenwasserversickerung bewirkten Steigerungen der Grundwasserneubildung erhebliche Grundwasseranstiege, großflächige Vernässungen und Steigerungen der Fremdwasserzuflüsse verursachen.

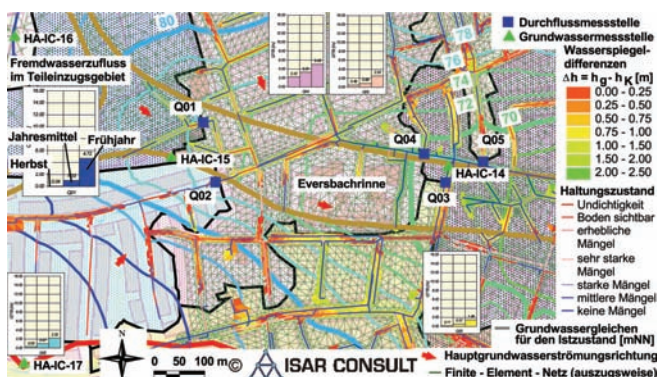


Abb. 5: Westliches Modellgebiet mit Ausschnitten des Finite-Element-Netzes, der bestehenden Kanalhaltungszustände, des Messnetzes und der für den Ist-Zustand für hohe Frühjahrsgrundwasserstände simulierten Grundwassergleichen und Hauptgrundwasserströmungsrichtungen, der entlang der vorhandenen Kanaltrassen vorherrschenden Differenzen zwischen Grundwasser- und zugehörigen Kanalwasserspiegeln und der nachgewiesenen grundwasserbürtigen Fremdwasserzuflüsse [3] der zugehörigen Teileinzugsgebiete

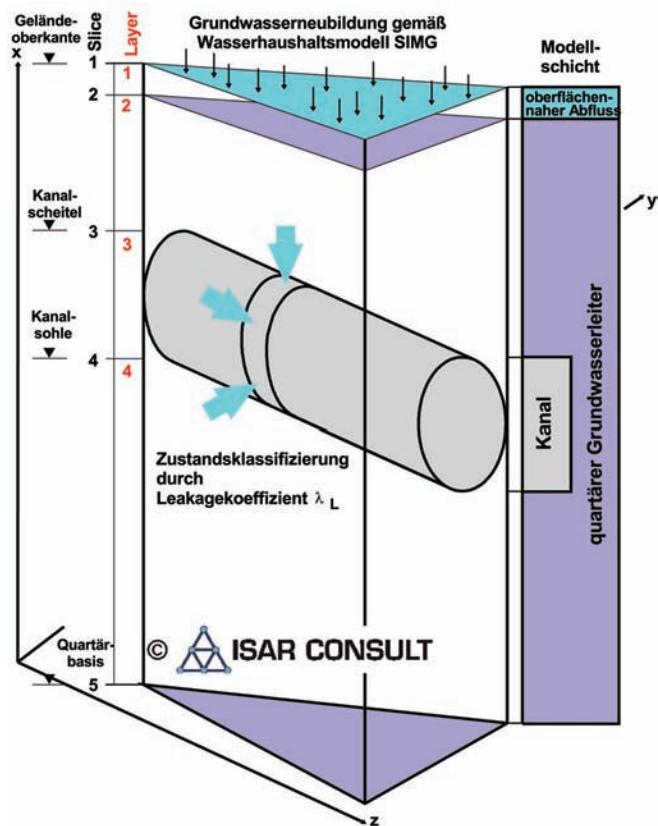


Abb. 6: Schematische Skizze zum Vertikalaufbau des 3D-Finite-Element-Netzes

7 Modellgebiet und Modellaufbau

Abbildung 2 zeigt die Geländehöhenverteilung des ca. 5,0 km² großen Modellgebiets mit der bis zu ca. 10 m eingetieften Eversbachrinne. Das Modellgebiet ist im Norden und Südwesten durch lokale Grundwasserscheiden und im Osten und Südosten durch die Geinegge und den Eversbachunterlauf begrenzt, die Grundwasservorfluter sind. Im Osten des vorwiegend kleinstädtisch geprägten Modellgebiets existiert das stark versiegelte Gewerbegebiet Römerstraße. Der landwirtschaftlich genutzte westliche Modellbereich wird auf 43 ha großen Neubaugebiet Krecktingstraße umgenutzt.

Im Modellgebiet besteht der oberflächennahe Grundwasserleiter aus quartären Lockersedimenten, dessen Basis durch nahezu undurchlässige verfestigte Ton- und Kalkmergelsteine der Oberkreide gebildet wird. Außerhalb der in Abbildung 2 gekennzeichneten Eversbachrinne bestehen die Lockersedimente aus gering durchlässigen eiszeitlichen Grundmoränen und nacheiszeitlichen Flugsanden, innerhalb der Eversbachrinne dagegen aus bis zu ca. 17 m mächtigen kiesigen grob- bis feinsandigen Flussablagerungen, die deutlich größere hydraulische Durchlässigkeiten aufweisen.

Das Modellgebiet wurde unter Berücksichtigung aller vorhandenen Kanalhaltungen und der kleinräumig variierenden Landnutzungen und Untergrundverhältnisse mithilfe eines aus ca. 251.000 Dreiecksprismen bestehenden räumlichen Finite-Element-Netzes diskretisiert, das in Abbildung 5 auszugsweise dargestellt ist. Abbildung 6 verdeutlicht schematisch den vier hydrostratigraphische Struktureinheiten und fünf Schichtgrenzen umfassenden Vertikalaufbau des Finite-Element-Netzes, durch den die lokal stark variierenden Niveaus der Geländehö-

hen, der Sohl- und Scheitelhöhen der einzelnen Kanalhaltungen und der Aquiferbasis detailliert erfasst wurden.

Die inner- und außerhalb der Eversbachrinne gelegenen Modellbereiche wurden verschiedenen hydrostratigraphischen Struktureinheiten zugeordnet, deren hydraulische Durchlässigkeiten und Porositäten durch Kalibrierung bestimmt wurden. Die unterschiedlichen und in Neubaugebieten auch zeitabhängigen Versiegelungsgrade und Landnutzungen wurden durch entsprechend variierte Eigenschaften der Oberflächenelemente erfasst. Die in Abbildung 5 auszugsweise dokumentierten Kanalhaltungszustände wurden mittels nichtlinearer Leakage-Koeffizienten λ_L erfasst, die gemäß der jeweiligen Schadensklasse vorbelegt und anhand der bekannten Fremdwasserzuflüsse [3] genauer und detaillierter kalibriert wurden. Der gewählte Leakage-Ansatz $Q_F = \lambda_L \times \Delta h \times l$ [2] stellt sicher, dass grundwasserbürtige Fremdwasserzuflüsse Q_F gemäß den Abbildungen 5 und 6 nur in undichten Haltungen auftreten, deren Kanalwasserspiegel h_k entsprechend $\Delta h = h_g - h_k > 0$ die Niveaus h_g der angrenzenden Grundwasserspiegel unterschreiten. Die grundwasserbürtigen Fremdwasserzuflüsse nehmen gemäß $Q_F = \lambda_L \times \Delta h \times l$ mit zunehmendem Grundwassereinstau Δh , mit zunehmender Länge l und mit zunehmendem Leakage-Koeffizienten λ_L der Kanalhaltung zu. Dem entsprechend wurden bestehende oder geplante Kanalabdichtungen haltungsscharf durch $\lambda_L = 0$ erfasst.

8 Kalibrierung

Bevor die geohydraulischen Auswirkungen vorgegebener hydraulischer Belastungen (zum Beispiel Niederschläge) und Randbedingungen (zum Beispiel Kanalabdichtungen, Regenwasserversickerungen und Landnutzungsänderungen) zuverlässig prognostiziert werden konnten, musste das Grundwassermodell zunächst instationär kalibriert werden. Im Rahmen der Kalibrierung wurden die überwiegend unveränderlichen Systemparameter (zum Beispiel die lokal stark variierenden hydraulischen Durchlässigkeiten, Porositäten und Leakage-Koeffizienten) anhand der im Rahmen des hydrometrischen Messprogramms [3, 4] in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassten Systemreaktionen (vor allem der digital aufgezeichneten Grundwasserstände und Fremdwasserzuflüsse) iterativ so bestimmt, dass das Computermodell auf vorgegebene hydraulische Belastungen und Randbedingungen ganz ähnlich reagiert wie der tatsächliche Aquifer.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch typische Kalibrierergebnisse. In Abbildung 7a wurden die in der Grundwassermessstelle HA-IC-14 gemessenen Standrohrspiegelhöhen [4] den für diese Position instationär simulierten Grundwasserpotenzialen gegenübergestellt. Beide Grundwasserstandsganglinien stimmen für den gesamten Vergleichszeitraum trotz erheblicher Grundwasserstandsschwankungen gut überein. Abbildung 7b vergleicht die in der Kanaldurchflussmessstelle Q04 gemessenen Fremdwasserabflüsse [3] mit den für diese Kanalhaltung instationär simulierten Fremdwasserabflüssen. Die stark variierenden und im Frühjahr deutlich erhöhten simulierten Fremdwasserabflüsse stimmen mit den aus [3] abgeleiteten Fremdwasserabflüssen für den gesamten Vergleichszeitraum gut überein. Auch für die übrigen Grundwasser- und Durchflussmessstellen stimmen die instationär simulierten Grundwasserpotenziale und Fremdwasserzuflüsse gut mit den in [3] und [4] dokumentierten Messwerten überein [2].

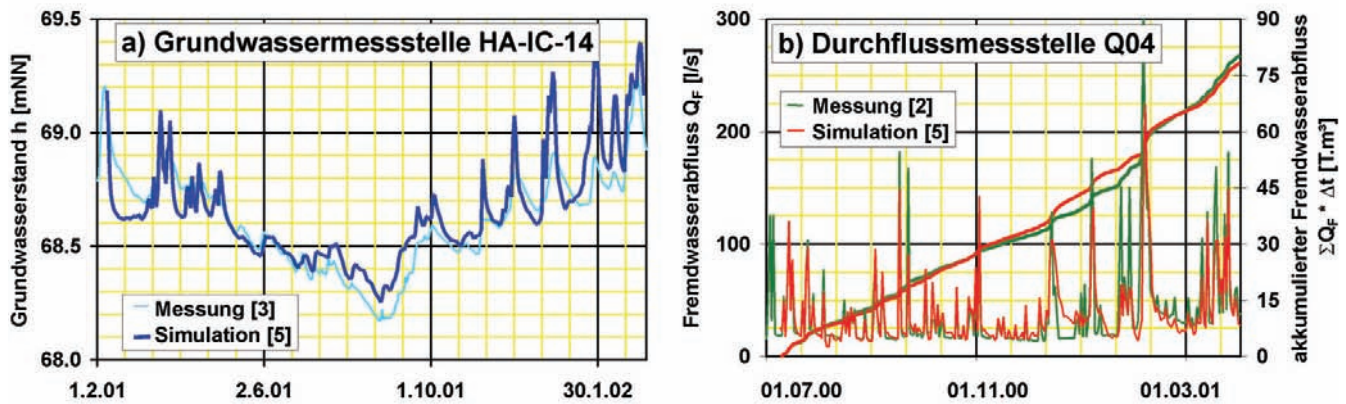


Abb. 7: Vergleich simulierter Grundwasserstände und Fremdwasserabflüsse mit Messwerten des hydrometrischen Messprogramms [3, 4]

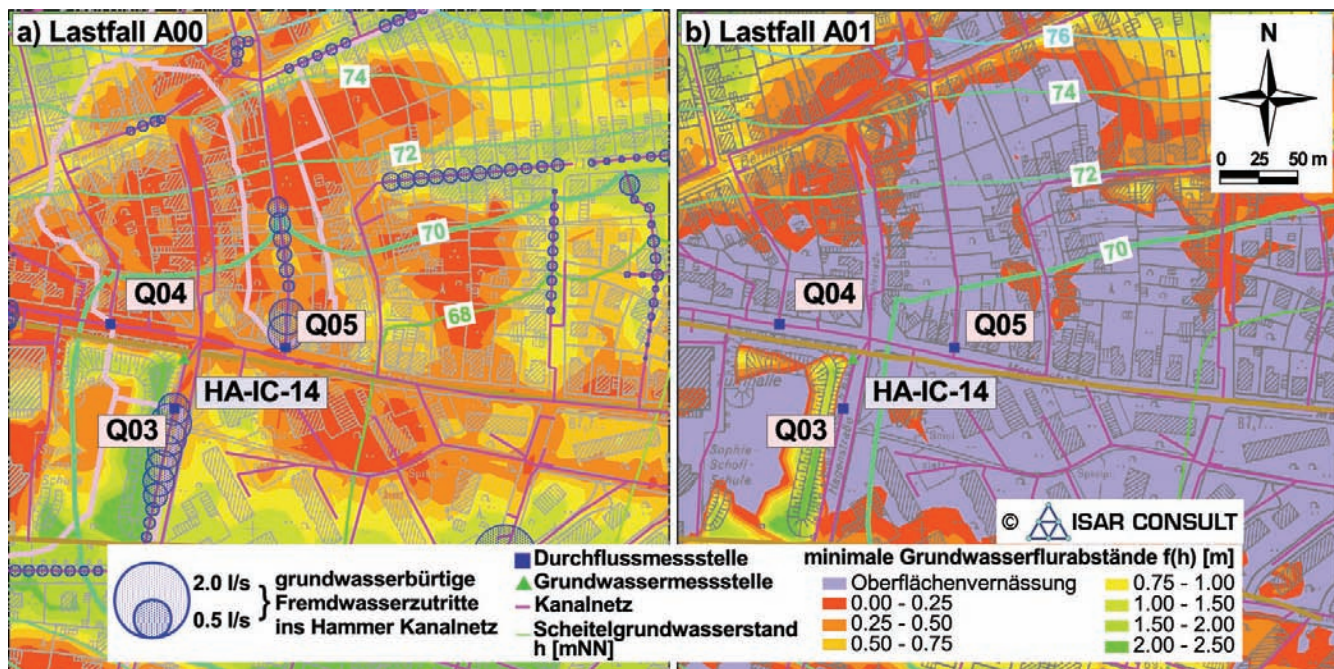


Abb. 8: Auszugsweise Darstellung der den Lastfällen A00 und A01 entsprechenden Scheitelgrundwasserstände, minimalen Grundwasserflurabstände und grundwasserbürtigen Fremdwasserzutritte in das Hammer Kanalnetz [2]

9 Modellprognosen

Mithilfe des kalibrierten und damit prognosefähigen Grundwassermodells wurden im Rahmen instationärer Lastfälle systematisch die geohydraulischen Auswirkungen verschiedener Kombinationen hydraulischer Belastungen und hydraulischer Randbedingungen simuliert. Der hydraulischen Belastung A liegen aufgezeichnete Wetterdaten zugrunde, die etwa die in Hamm zu erwartenden langjährigen Mittelwerte repräsentieren. Der hydraulischen Belastung B entsprechen dagegen die aufgezeichneten Wetterdaten eines regenreichen Zeitraums mit einer um 20 % erhöhten mittleren monatlichen Niederschlagssumme von $P = 77 \text{ mm}$ [2].

9.1 Ist-Zustand

Im Rahmen des Referenzlastfalls A00 wurden die bei der hydraulischen Belastung A unter den Randbedingungen 00 des Ist-Zustands (keine Kanalabdichtungen) zu erwartenden Grundwasserströmungsverhältnisse instationär simuliert. Abbildung

8a zeigt die diesem Lastfall entsprechenden Scheitelgrundwasserstände, die minimalen Grundwasserflurabstände und die grundwasserbürtigen Fremdwasserzutritte in das Kanalnetz auszugsweise für den östlichen Bereich der Eversbachrinne.

Am Verlauf der Isohypsen ist die Vorflutfunktion der zentralen Eversbachrinne und der tief liegenden undichten Mischwasserkanäle gut erkennbar. Die grundwasserbürtigen Fremdwasserzuflüsse sind in Abbildung 8a außerdem an den entlang der Kanalhaltungen dargestellten blauen Kreise erkennbar, deren Fläche der zugehörigen Größe des grundwasserbürtigen Fremdwasserzuflusses proportional ist. Entlang der hoch durchlässigen zentralen Eversbachrinne bildet sich ein weit reichender flacher Absenktrichter aus, der große Fremdwasserzutritte in die schadhafte Mischwasserkanalisation bewirkt. In den wesentlich geringer durchlässigen Modellrandbereichen bilden sich dagegen erheblich steilere Absenktrichter geringer Reichweite aus, die nur stark verminderte Fremdwasserzutritte in die schadhafte Kanalhaltungen erlauben.

Gemäß Abbildung 8a werden beim Referenzlastfall A00 bereichsweise minimale Grundwasserflurabstände von

$f(h) = 0.25$ m unterschritten, so dass die bestehende Bebauung selbst unter den derzeit noch vorherrschenden Verhältnissen trotz der nachgewiesenen Dränagewirkung der schadhafte Kanalisation teilweise vernässungsgefährdet ist. Für den Mittelwasserlastfall A00 ergibt sich für das gesamte Modellgebiet ein mittlerer grundwasserbürtiger Fremdwasserzufluss von $Q_F = 21,6$ l/s in die undichte Kanalisation, der beim Referenzlastfall B00 mehr als doppelt so groß ist, obwohl diesem die lediglich um 20 % erhöhte mittlere monatliche Niederschlagssumme der hydraulischen Belastung B zugrunde liegt. Somit bewirken selbst relativ kleine Niederschlagssteigerungen und/oder Niederschlagsverlagerungen vom Sommer- ins Winterhalbjahr stark erhöhte grundwasserbürtige Fremdwasserzuflüsse.

9.2 Kanalabdichtung ohne Ausgleichsmaßnahmen

Den in Abbildung 8b auszugsweise dargestellten Simulationsergebnissen des Vergleichslastfalls A01 liegen ebenfalls die hydraulische Belastung A sowie die einem vollständig abgedichteten Kanalnetz ohne ergänzende Ausgleichsmaßnahmen entsprechenden Randbedingungen 01 zugrunde. Gemäß Abbildung 8b bewirken die Kanalabdichtungen sehr großflächige Grundwasseranstiege gegenüber dem Referenzlastfall A00 um bis zu ca. $\Delta h = 3,0$ m, aus denen stark verminderte und großflächig auch negative Grundwasserflurabstände $f(h) < 0$ resultieren, die diejenigen Stadtteile kennzeichnen, in denen bei einer vollständigen Kanalsanierung ohne ergänzende Ausgleichsmaßnahmen relativ häufig oder sogar ständig Oberflächenvernässungen zu erwarten sind.

Abbildung 9 veranschaulicht schematisch die durch fortschreitende Kanalabdichtungen bewirkten systematischen Veränderungen der Grundwasservorflutverhältnisse. Im Ist-Zustand strömt das Grundwasser bevorzugt der tiefsten schadhafte Kanalhaltung zu. Gemäß Abbildung 9 ist die bevorzugte Abdichtung hoch liegender Kanäle ineffektiv, weil sie hohe Kosten verursacht, ohne zur Fremdwasserreduktion beizutragen. Bevorzugte Abdichtungen der jeweils tiefsten Kanäle verhindern dagegen direkte Fremdwasserzusickerungen in diese Kanäle. Dadurch verschlechtert sich die Grundwasservorflut, und bei unzureichender hydraulischer Leistungsfähigkeit des Grundwasserleiters steigt der Grundwasserspiegel schnell auf die Niveaus der nächst höheren schadhafte Kanäle an. Anschließend sickert nahezu dieselbe Fremdwassermenge, die früher in die tieferen, aber inzwischen sanierten Kanäle ausgesickert ist, den nächst höheren schadhafte Kanälen zu, die früher keine Fremdwasserzutritte aufwiesen. Durch die bevorzug-

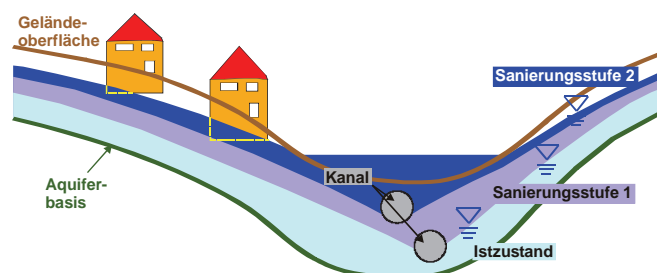


Abb. 9: Durch fortschreitende Abdichtungen der jeweils tiefsten Kanäle ohne Ausgleichsmaßnahmen bewirkte systematische Grundwasseraufhöhungen und Verlagerungen der Fremdwasserzutritte in höher gelegene Nachbarkanäle

te Sanierung der jeweils tiefsten schadhaften Kanäle werden somit bei unzureichender hydraulischer Leistungsfähigkeit des Aquifers auch keine nennenswerten Fremdwasserreduktionen, sondern nur systematische Grundwasseranstiege und dadurch verursachte Verlagerungen der Fremdwasserzutritte in höher liegende schadhafte Kanäle erzielt, die früher keine Fremdwasserzutritte aufwiesen.

Die dem Lastfall A01 zugrunde liegende Abdichtung aller schadhaften Kanäle bewirkt aufgrund der fehlenden direkten Vorflutwirkung der abgedichteten Kanalisation, dass das Grundwasser großflächig so stark ansteigt, bis es in vorhandenen Senken an der Geländeoberfläche austritt und gemäß Abbildung 8b das Gelände hier so hoch einstaut, bis das Wasser über die vorhandenen Kanalschächte oder defekte Hausanschlüsse in die sanierte Mischwasserkanalisation eindringt.

Daraus folgt: Bei unzureichender hydraulischer Leistungsfähigkeit des Aquifers sind Kanalabdichtungen ohne wirksame Ausgleichsmaßnahmen ineffektiv, weil sie keine nennenswerten Fremdwasserreduktionen, aber hohe Kosten und außerdem erhebliche großflächige Grundwasseraufhöhungen verursachen, die beträchtliche Oberflächenvernässungen, Bauschäden und Nutzungseinschränkungen bewirken können, die keineswegs auf das unmittelbare Umfeld der sanierten Kanalhaltungen beschränkt sein müssen. Die SH hat daher sowohl teilweise als auch vollständige Kanalabdichtungen ohne begleitende Ausgleichsmaßnahmen wegen Ineffektivität verworfen.

9.3 Optimierung alternativer Ausgleichsmaßnahmen

Daher wurden nachfolgend ausschließlich Kanalabdichtungen analysiert, die durch alternative Ausgleichsmaßnahmen ergänzt wurden, um die Grundwasservorflutfunktion des ehemaligen Eversbaches und des schadhaften Kanalsystems zu ersetzen. Die Ausgleichsmaßnahmen wurden iterativ so optimiert, dass

- die grundwasserbürtigen Fremdwasserzuflüsse zur Kläranlage,
- die Veränderungen der bestehenden Grundwasserhältnisse
- sowie die erforderlichen Kosten

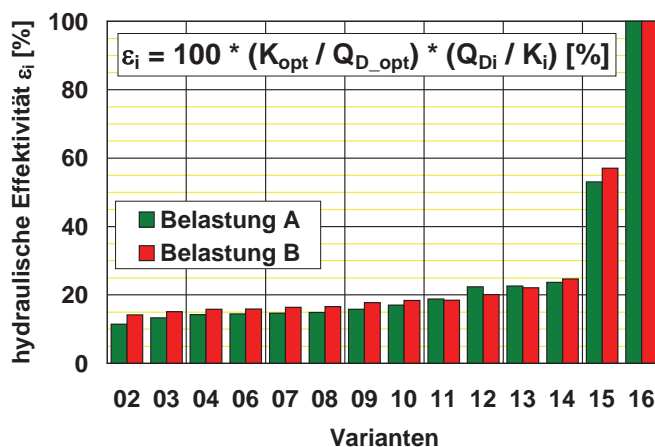


Abb. 10: Hydraulische Effektivitäten alternativer Grundwasserdränagesysteme

unter Gewährleistung standortspezifischer bautechnischer, baubetrieblicher und trassierungsrelevanter Vorgaben der SH minimiert wurden. Dabei wurden die aus der Ausweisung des ca. 43 ha großen Neubaugebiets Krectingstraße (vgl. Abbildung 2) resultierenden systematischen Veränderungen der lokalen Grundwasserneubildungen und der lokalen Grundwasserflurabstände detailliert berücksichtigt.

Im Rahmen des Lastfalls A02 wurden die geohydraulischen Auswirkungen einer entlang der zentralen Eversbachrinne verlaufenden ca. 1,9 km langen Grundwasserdränage simuliert. Die in Abbildung 3 von [1] dargestellten minimalen Grundwasserflurabstände dieses Lastfalls zeigen, dass mithilfe dieser zentralen Grundwasserdränage systematische Grundwasseranstiege zwar weitgehend entlang der hoch durchlässigen Eversbachrinne, aber nicht in den gering durchlässigen Modellrandbereichen verhindert werden können, in denen bei diesem Szenario inakzeptable Oberflächenvernässungen zu erwarten sind. Also muss die entlang der Eversbachrinne verlaufende zentrale Grundwasserdränage in den vernässungsgefährdeten Modellrandbereichen gemäß Abbildung 4 von [1] durch ein standortgerechtes feines Dränagenetz ergänzt werden.

Mithilfe des Grundwassermodells wurden die geohydraulischen Auswirkungen alternativer Grundwasserdränagesysteme haltungsscharf simuliert und darauf aufbauend die Verbreitung, die Lage und die Feinheit des Dränagenetzes sowie die Sohlneiveaus der einzelnen Dränageröhre iterativ gemäß den Vorgaben der SH optimiert. Hierzu wurden 15 Varianten alternativer Grundwasserdränagesysteme analysiert, die jeweils aufgrund der für die vorhergehenden Varianten erzielten Simulationsergebnisse systematisch verbessert wurden. Hierzu wurde für jede dieser Varianten i gemäß

$$\epsilon_i = 100 \times (K_{opt}/Q_{D_{opt}}) \times Q_{Di} / K_i \quad (1)$$

die hydraulische Effektivität ϵ_i aus dem Verhältnis der erzielbaren Reduktion des Fremdwasserzuflusses Q_{Di} zur Kläranlage und der zugehörigen Kosten K_i dieser Variante ermittelt. Alle hydraulischen Effektivitäten ϵ_i wurden mit dem aus der hydraulisch effektivsten Variante abgeleiteten Faktor $100 \times (K_{opt}/Q_{D_{opt}})$ so skaliert, dass sich für diese Variante eine auf 100 % normierte dimensionslose Effektivität und für alle anderen Varianten entsprechend kleinere dimensionslose Effektivitäten ϵ_i ergeben.

Gemäß Gleichung 1 ist ein Grundwasserdränagesystem i um so effektiver, je größer die mit seiner Hilfe erzielbare Fremdwasserreduktion Q_{Di} und je geringer die dazu erforderlichen Kosten K_i sind. Die in Abbildung 10 dargestellten hydraulischen Effektivitäten ϵ_i der 15 analysierten Grundwasserdränagesysteme zeigen, dass die hydraulische Effektivität des ursprünglich vorgesehenen Grundwasserdränagesystems durch seine systematische modellgestützte Optimierung um mehr als das Achtfache gesteigert wurde. Mithilfe des modellgestützt optimierten Grundwasserdränagesystems wird somit bei nur ca. 12 % der erforderlichen Kosten die gleiche Fremdwasserreduktion Q_{Di} erzielt wie mithilfe des ursprünglich vorgesehenen nicht optimierten Grundwasserdränagesystems. Damit konnten durch den gezielten Einsatz des instationär gekoppelten Wasserhaushalts- und 3D-Grundwassermodells Hamm-Bockum-Hövel [2] Baukosten eingespart, Bauzeiten verkürzt und großflächige Vernässungsschäden infolge ineffektiver Kanalsanierungen vermieden werden.

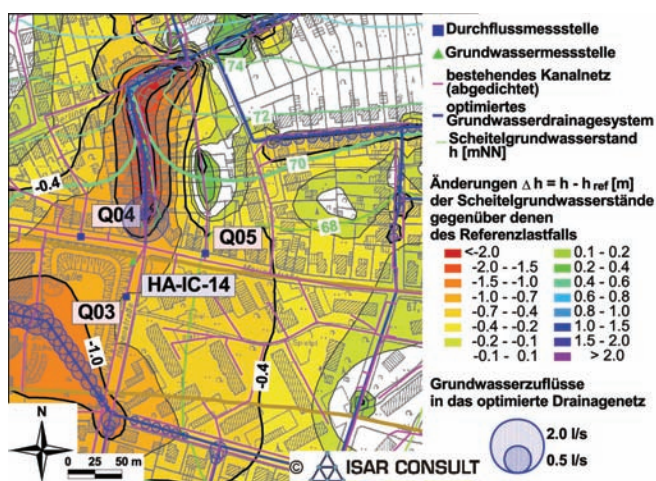


Abb. 11: Auszugsweise Darstellung der dem optimierten Grundwasserdrainagesystem bei Mittelwasserverhältnissen entsprechenden Scheitelgrundwasserstände h , der grundwasserbürtigen Fremdwasserzutritte in das optimierte Grundwasserdrainagesystem und der Änderungen $\Delta h = h - h_{A00}$ der Scheitelgrundwasserstände gegenüber denen des Referenzlastfalls A00 [2]

Das den örtlichen Verhältnissen angepasste und gemäß den Vorgaben der Stadtentwässerung Hamm modellgestützt systematisch optimierte Grundwasserdrainagesystem und seine bautechnischen Ausführungsdetails sind in [1] beschrieben. Gemäß Abbildung 11 ergeben sich für dieses optimierte Grundwasserdrainagesystem bei Mittelwasserverhältnissen entlang der von der Isar Consult GmbH hinsichtlich Trassierung, Längen und Sohlhöhen optimierten Drainagekanäle lokal begrenzt geringfügig erhöhte Absenkungen der Scheitelgrundwasserstände gegenüber denen des Ist-Zustands, während in den übrigen teilweise dicht bebauten Bereichen nur sehr kleine Grundwasserabsenkungen und vor allem keine großflächigen Grundwasserstandsaufhöhungen und keinerlei Oberflächenvernässungen zu erwarten sind.

10 Fazit

Durch das modellgestützt optimierte Grundwasserdrainagesystem lassen sich trotz vollständiger Kanalabdichtung inakzeptable Grundwasseraufhöhungen und Vernässungen vermeiden und der grundwasserbürtige Fremdwasserzufluss zur Kläranlage Hamm-West um ca. 0,62 Millionen m^3/a bzw. um 94 % reduzieren. Infolge der daraus resultierenden dauerhaften Einsparungen ist es für die Stadtentwässerung Hamm wirtschaftlicher, das optimierte Grundwasserdrainagesystem umgehend zu realisieren als darauf zu verzichten. Die ersten Bauabschnitte wurden daher bereits realisiert. Ihre Auswirkungen haben die Modellprognosen bestätigt.

Das instationär gekoppelte Wasserhaushalts- und 3D-Grundwassermodell Hamm-Bockum-Hövel [2] wird im Rahmen der langfristigen Modellpflege gemäß den realisierten Kanalabdichtungen und Landnutzungsänderungen fortlaufend aktualisiert. Dadurch verfügt die Stadtentwässerung Hamm über ein stets aktuelles und jederzeit einsetzbares Werkzeug, das es erlaubt, flächendeckende instationäre Prognosen der stark jahreszeitabhängigen geohydraulischen Auswirkungen alternativer Veränderungen der Landnutzungen, Regenwasserversickerungen, Kanalabdichtungen, Drainagemassnahmen,

Brunnentnahmen und vieler anderer Eingriffe in das örtliche Grundwasserregime für unterschiedliche hydraulische Belastungen (zum Beispiel für besonders trockene oder feuchte Jahre) in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu erstellen und darauf aufbauend die geplanten Maßnahmen standortgerecht zu optimieren.

Das Grundwassermodell [2] bietet der Stadtentwässerung Hamm die notwendige Planungssicherheit, weil es kurzfristig sehr flexibel eingesetzt werden kann, um bereits vor der Ausführung geplanter Maßnahmen sichere und räumlich differenzierte Prognosen darüber zu liefern, welche Grundwasserverhältnisse sich nach der Ausführung dieser Maßnahmen einstellen werden. Dadurch lassen sich Planungs- und Ausführungsfehler sowie daraus möglicherweise resultierende Folgeschäden sehr frühzeitig erkennen und vermeiden, Bauzeiten verkürzen und Kosten einsparen.

Außerdem lassen sich bei begrenztem Budget Ausführungsprioritäten so optimieren, dass die effektivsten Maßnahmen bevorzugt realisiert und weniger effektive Maßnahmen später umgesetzt oder vermieden werden. Diese Entscheidungen können jedoch nur sinnvoll und nachvollziehbar getroffen werden, wenn die Effektivität einer Maßnahme vor ihrer Ausführung zuverlässig beurteilt und mit den Effektivitäten alternativer Maßnahmen objektiv verglichen werden kann. Daher nutzt die Stadtentwässerung Hamm die detaillierten Modellprognosen außerdem, um die optimierte Projektierung gegenüber Maßnahmenträgern, Planern und Behörden anschaulich und damit nachvollziehbar zu vertreten.

Literatur

- [1] E. Ristenpart, U. Kasting, C. Langweg: Fremd- und Grundwasserbewirtschaftung im Rahmen der Gebietsentwässerungsplanung, KA 11/2007 (54), 1116–1128
- [2] Isar Consult GmbH: *Schlussbericht über das instationär gekoppelte Wasserhaushalts- und 3D-Grundwassermodell Hamm-Bockum-Hövel-Mitte*, erstellt im Auftrag der Stadt Hamm, unveröffentlicht, 2006
- [3] Isar Consult GmbH: *Schlussbericht über das Durchflussmessprogramm 2000/2001*, erstellt im Auftrag der Stadt Hamm, unveröffentlicht, 2002
- [4] Isar Consult GmbH: *Schlussbericht über das Grundwassermessprogramm 2001/2002*, erstellt im Auftrag der Stadt Hamm, unveröffentlicht, 2002
- [5] Isar Consult GmbH: *Erläuterung des Wasserhaushaltsmodells SIMG*, unveröffentlicht, 2005
- [6] Merkblatt ATV-DVWK-M 504: *Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden*, Hennef, 2002

Autoren

Dipl.-Ing. Rolf Becker, Dipl.-Ing. Jörg Kögel
 Dipl.-Ing. Christoph Langweg
 Lippeverband, Stadtentwässerung Hamm
 Gustav-Heinemann-Straße 10
 59065 Hamm

Dr.-Ing. Christian Kölling, Dipl.-Geol. Christian Tomsu
 Isar Consult – Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft GmbH
 Bürgermeister-Graf-Ring 10
 82538 Geretsried

E-Mail: langweg.christoph@eglv.de

