



# Kiwa Water Research

entwickelt ein Werkzeug zur Überwachung von Grundwasserpegeln



VON JOS VON ASMUTH,  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DELFT

Voorne's Duin ist eins der bedeutendsten Naturreservate in Westeuropa. Es ist berühmt für seine vielfältige Pflanzen- und Tierwelt und beheimatet mehr als 60% aller niederländischen Vogelarten. Es grenzt aber auch an Rotterdam, einen der größten Seehäfen der Welt und an das Industriegebiet De Massvlakte.

Zur Entlastung des überfüllten Rotterdam überlegt die niederländische Regierung, neues Land aus dem Meer zu gewinnen. Dieses Landgewinnungsprojekt würde den Grundwasserspiegel beeinflussen und damit erhebliche Folgen für die seltenen Tiere und Pflanzen in Voorne's Duin haben, beispielsweise die Moororchidee und die Schmale Windelschnecke.

Jos von Asmuth von und Kees Maas, zwei Forscher von Kiwa Water Research und der Technischen Universität Delft, wurden vom Ministerium für Verkehr, öffentliche Arbeiten und Wasserwirtschaft sowie dem Staatlichen Institut für Küste und See beauftragt, Grundwasserdaten zusammenzustellen, die diesen Einrichtungen helfen sollten, über Schutzmaßnahmen für die betroffenen Habitate zu entscheiden. Im vorliegenden Artikel beschreibt von Asmuth, wie er, Maas und ihr gemeinsames Team Menyanthes entwickelt haben, ein auf MATLAB® basierendes Werkzeug, mit dem Hydrologen und Ökologen Zeitreihenmodelle zur Sammlung und Interpretation von Grundwasserdaten nutzen können.

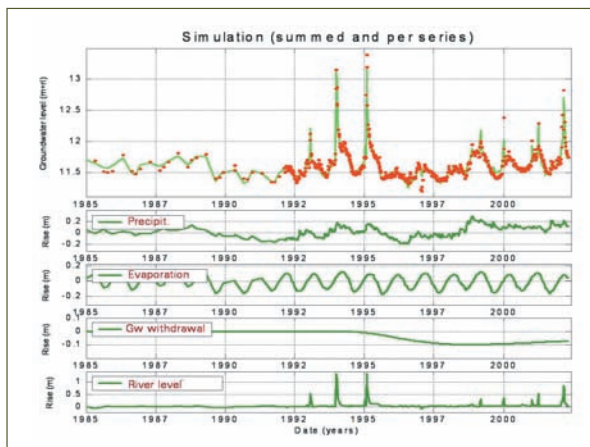


Abb. 1: Ein an lückenhafte Daten angepasstes Zeitreihenmodell. Die vier unteren Diagramme stellen dar, welchen Anteil die Zeitreihen verschiedener Einflussgrößen an der Veränderung der Grundwasserpegel haben.

MATLAB wurde zur gesamten Verarbeitung und Analyse der beobachteten Grundwasserpegel eingesetzt, von der Erfassung der Messwerte bis hin zur Visualisierung der Modellierungsergebnisse. Durch seine leistungsfähigen Funktionen und seine Fähigkeiten zur Entwicklung von eigenständigen Applikationen konnten wir die gesamte benötigte Funktionalität in einer einzigen Anwendung zusammenfassen.

### Behandlung realer Messdaten

Die verwendeten Grundwasserdaten wurden gezippten Sammlungen von ASCII-Dateien aus der umfassenden staatlichen geohydrologischen Datenbank DINO (Data and Information of the Subsoil in the Netherlands) entnommen, die einfach mit der MATLAB-Funktion `unzip` dekomprimiert werden konnten. Daneben wurden Daten aus manuellen Messungen an Pegelrohren vor Ort sowie meteorologische Daten vom Niederländischen Meteorologischen Institut verwendet.

Die Arbeit mit einer großen Menge von Hand gesammelter Daten mit Fehlern, Lücken und unregelmäßigen Beobachtungsabständen war eine der größten Herausforderungen. Um dieses Problem zu bewältigen, entwickelte das Team eine Methode zur Modellierung der Zeitreihen in einem kontinuierlichen Zeitrahmen. Durch diesen zeitkontinuierlichen Ansatz fiel die Beobachtungsfrequenz völlig aus den Modellgleichungen heraus. Das Modell konnte dadurch sämtliche verfügbaren Daten unabhängig von den Abständen zwischen den Messungen handhaben und filtern (Abb. 1).

### Entwicklung der Zeitreihen-Modelle

Zeitreihen-Modelle sind leicht zu konstruieren und zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit aus. Die hier verwendeten Zeitreihen-Modelle stellen den Verlauf des Grundwasserspiegels jeweils an einem bestimmten Punkt im dreidimensionalen Raum dar. Sie basieren auf beobachteten Grundwasserpegeln und berücksichtigen außerdem Faktoren, die diese Pegel beeinflussen, wie Niederschläge, Verdunstung durch Boden und Pflanzen oder hydrologische Eingriffe.

Die dabei genutzten Daten stammen aus Beobachtungsreihen an 76 Pegelrohren, aus Niederschlagsmessungen und aus Schätzungen der Verdunstungsrate. Für letztere wurde die Verdunstungsrate von optimal mit Wasser versorgtem Weideland angesetzt, für die Daten von meteorologischen Stationen erhältlich sind. Mit Hilfe dieser Daten erzeugte das Team Zeitreihen-Modelle für sämtliche Messreihen der Grundwasserpegel. Diese Modelle ermöglichten es:

- Den Einfluss verschiedener Faktoren und Maßnahmen auf den Grundwasserpegel zu quantifizieren.
- Trends in der Entwicklung der Pegelstände festzustellen und zu quantifizieren.
- Kurze oder ungeordnete Messreihen zu filtern, zu verlängern oder zu vervollständigen.
- Grundwasser-Pegeldaten vorzuverarbeiten.
- Die durch äußere Faktoren wie Neubildung und Abpumpen von Grundwasser oder Flusspegel verursachte Dynamik der Grundwasserpegel vorherzusagen.

### Visualisierung der Ergebnisse

Die Forscher interpolierten die Ergebnisse der Modellierung und wandelten sie dann in Karten um, die die Grundwaserdynamik im untersuchten Gebiet anschaulich darstellten (Abb. 2).

Mit den von MATLAB bereitgestellten Visualisierungstechniken konnten rasch sämtliche Zeitreihen verarbeitet werden, ohne dass dadurch der Überblick über die Daten und Ergebnisse der Modellierung verloren ging. Mit Hilfe der MATLAB-Funktion `pcolor`, mit Oberflächenplots und Flächenelementen erstellte das Team Querschnitte durch die Förderbrunnen. Weiterhin wurde eine Karte mit GIS-Funktionalität (Geographic Information System) erstellt, die die Lage der einzelnen Messstellen anzeigt und es wurden Zeitreihen- und Balkendiagramme verwendet, um die Pegelverläufe grafisch darzustellen. Die Funktion `linkaxes` half, miteinander in Beziehung stehende Zeitreihen zu kennzeichnen.

Obwohl der Aufwand für die Erzeugung der Karten relativ gering war, gelangen mit ihrer Hilfe tiefe Einblicke in die hydrologischen Verhältnisse des Gebiets. Die MATLAB-Visualisierung deckte beispielsweise den Einfluss von Süßwasser

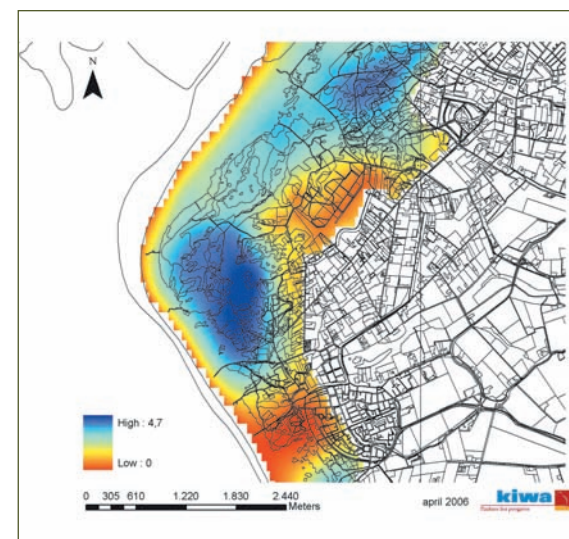


Abb. 2: Dynamik des Grundwasserpegels im Gebiet um Rotterdam.

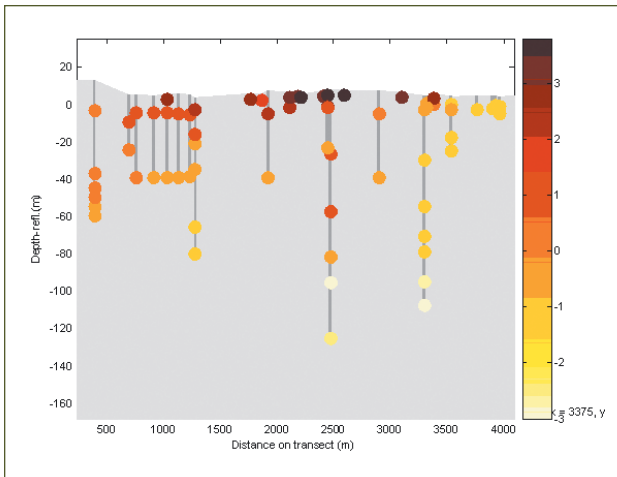


Abb. 3. Vom Zeitreihenmodell geschätzte Verflüchtungsniveaus (die Tiefen, in denen verschiedene wasserführende Schichten liegen). Die konvexe Entwicklung der Werte in den oberen Niveaus deckt auf, dass das Süßwasser in den oberen Bodenschichten auf Salzwasser in den tieferen Schichten schwimmt.

auf, das auf schwererem Salzwasser treibt – mit anderen Mitteln hätte diese Beobachtung eine umfassende Modellierung der Grundwasserverhältnisse erfordert (Abb. 3).

### Entwicklung von Menyanthes

Die vorgestellten Untersuchungsmethoden und Daten wurden nun in Menyanthes implementiert (Abb. 4). Mit diesem Werkzeug können Hydrologen und Ökologen Grundwasserdaten verwalten und verarbeiten und daraus Karten sowie zwei- und dreidimensionale Querschnitte der Ergebnisse erstellen.

Menyanthes unterstützt verschiedene Aufgaben wie die Filterung und Verlängerung begrenzter Zeitreihen, die Schätzung geohydrologischer Parameter und die Bestimmung des Einflusses bestimmter Faktoren wie der Trinkwassergewinnung aus Grundwasser, Schwankungen von Flut- oder Flusspegeln oder hydrologischen Maßnah-

men.

Menyanthes sollte eine effiziente Alternative zu den weit verbreiteten Box-Jenkins-Modellen anbieten, die auf Transferfunktionen basieren. Box-Jenkins-Modelle stellen zwar eine gute Lösung für dynamische Systeme mit unregelmäßigem Verhalten dar, weisen aber einige Nachteile auf. Sie sind beispielsweise komplex und erfordern außerdem Kenntnisse der zugrunde liegenden statistischen Theorie. Bei Menyanthes ist das Fachwissen darüber, wie sich Grundwassersysteme verhalten, bereits in das Modell eingebaut.

In Box-Jenkins-Modellen muss jede Zeitreihe für sich mit Hilfe eines heuristischen Identifikationsprozesses modelliert werden. Die Zeitreihenmodelle in Menyanthes sind standardisiert und vollständig automatisiert. Für Box-Jenkins-Modelle eignen sich nur Daten, die in regelmäßigen Abständen gemessen wurden (sofern es

sich um Zeitdomänen-Modelle handelt). In Menyanthes können die Forscher Fehler in ihren Daten gezielt aussortieren und Datenmanipulationen wie Interpolationen durchführen oder die zeitliche Auflösung der Datenreihen verändern.

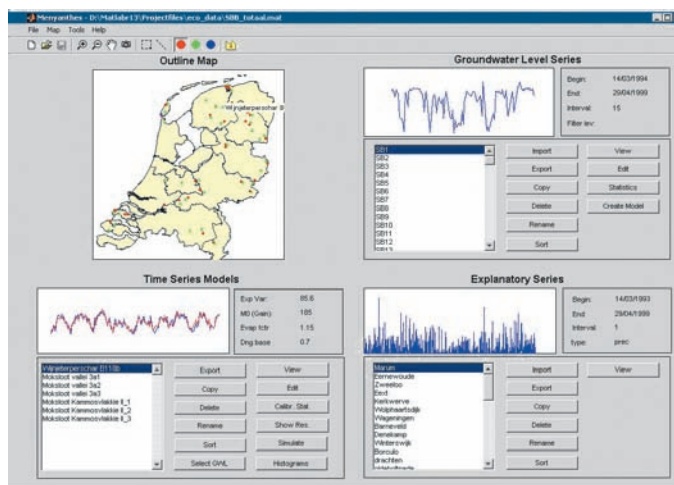
### Erweiterung der Ergebnisse

Gegenwärtig werden die mit MATLAB erzeugten Zeitreihen-Modelle in deterministische Modelle von Grundwasserströmungen integriert, die mit Hilfe eines in Python aufgebauten Analytische-Elemente-Modells entwickelt wurden.

Bei einer Zeitreihenanalyse wird die Beziehung zwischen den Zeitreihen der Eingabegrößen (etwa der Neubildungsrate) und den Zeitreihen der Ausgabegrößen (etwa an Pegelrohren beobachtete Grundwasserniveaus) mit Hilfe stochastischer Methoden bestimmt, ohne dass irgendwelche physikalischen Grundannahmen gemacht werden. Mit einem Zeitreihenmodell kann man daher nur vorhersagen, wie sich zeitliche Schwankungen der Eingabegrößen auf den Wasserstand an einem bestimmten Pegelrohr auswirken; Auswirkungen auf andere Orte sind nicht vorhersagbar. Außerdem kann ein Zeitreihenmodell keine Aussagen darüber machen, wie sich Veränderungen der wasserführenden Schicht oder neu hinzu kommende Faktoren auswirken.

Die Integration von Zeitreihen-Modellen mit deterministischen Grundwassermodellen wird es ermöglichen, die erhaltenen Ergebnisse auf das gesamte wasserführende System auszudehnen. Außerdem lassen sich dann die Auswirkungen von Veränderungen im hydrologischen System vorhersagen. ◀◀

Abb. 4: Das Hauptfenster von Menyanthes beinhaltet eine Karte mit den Positionen aller Pegelrohre, die Zeitreihen aller Grundwasserpegel, die Zeitreihen der Einflussgrößen sowie die Ergebnisse der Zeitreihen-Modelle.



### QUELLEN

► Kiwa Water Research  
www.kiwa.nl

► Menyanthes  
www.mathworks.com/res/menyanthes

