



# Risikobasiertes Grundwassermonitoring für Wasserschutzgebiete

Quelle: Otto Dürst - Fotolia.com

Für das Risikomanagement in Wasserschutzgebieten wird ein **risikobasiertes Grundwassermonitoring** vorgestellt, mit dem es möglich ist, die Güte eines IST-Messnetzes zu bewerten und ein optimiertes ZIEL-Messnetz zu entwerfen. Hierzu wurde ein neues **numerisches Werkzeug** entwickelt, das Messnetze mit den Größen Detektionswahrscheinlichkeit, Nutzen der Vorwarnzeit und Kosten bewertet und optimiert. Der Beitrag basiert auf Arbeiten bei der Landeswasserversorgung und einem gerade abgeschlossenen **DVGW-Forschungs- & Entwicklungsprojekt**.

von: Dr.-Ing. Martin Emmert, Niklas Zigelli, Prof. Dr.-Ing. Frieder Haakh (alle: Zweckverband Landeswasserversorgung), Felix Bode & Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak (beide: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart)

Die **Überwachung** der Grundwasserbeschaffenheit ist ein wichtiger Baustein des Multibarrieren-Prinzips. Zentrale Aufgabe ist es, Risiken im Einzugsgebiet von Grundwasserfassungen systematisch zu erfassen und zu dokumentieren, durch Monitoring rechtzeitig zu erkennen und zu beherrschen. Das Betreiben eines Überwachungsmessnetzes (im weiteren „Messnetz“ genannt) ist ein Bestandteil der Risikobeherrschung [1]. Das DVGW-Arbeitsblatt W 108 „Messnetze zur Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit in Wassergewinnungs-

gebieten“ beschreibt Grundsätze der Planung und des Betriebs eines solchen Messnetzes. Die bisher bestehenden Messnetze sind in der Regel historisch gewachsen und deshalb meist nicht effizient. D. h., entweder ist die Überwachungsqualität des Messnetzes bei gegebenen Kosten relativ gering oder die Kosten können ohne Verlust an Überwachungsqualität durch Optimierung des Messnetzes gesenkt werden. So existieren Messstellen, die keine konkrete Gefährdung überwachen, oder Gefährdungen werden nicht bzw. zu spät gesehen (Abb. 1).

## Zielsetzung

Mit dem zweijährigen F&E-Vorhaben wurden folgende Fragen beantwortet:

- Wie kann die Leistungsfähigkeit eines bestehenden Messnetzes objektiv beschrieben werden (qualitativ und quantitativ)?
- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, trotz eines bestehenden Messnetzes nicht alle Risiken zu überwachen?
- Wie kann kosteneffizient aus einem bestehenden Messnetz ein optimiertes entwickelt werden?

Ein optimiertes Messnetz (Abb. 2) hat alle Gefährdungen im „Blick“, lässt dem Wasserversorger bei einem Schadensfall genügend Zeit, um zu reagieren, und ist kostengünstig. Die dazu nötigen Schritte sind in Abbildung 3 aufgezeigt.

Im Projekt wurde auch eine qualitative Methode für Wasserversorgungsunternehmen ohne numerisches Strömungsmodell entwickelt. Für die qualitative Analyse und Optimierung werden lediglich Grundwassergleichenpläne,  $k_f$ - und  $n_f$ -Werte benötigt. Nachfolgend wird auf die quantitative Methode näher eingegangen.

### Optimierung eines Messnetzes

Der erste Schritt in Abbildung 3, die Gefährdungsanalyse (1), wurde bereits durch das Vorprojekt [2] ausführlich beschrieben, dessen Ergebnisse in [1] mündeten. Das Ziel der Analyse des IST-Messnetzes (2) ist es, die Qualität des bestehenden Messnetzes objektiv zu beschreiben. Folgende Fragen werden beantwortet: Mit welcher Wahrscheinlichkeit werden

die Risiken überwacht? Mit welcher Vorwarnzeit werden die Risiken überwacht? Wie teuer ist das Messnetz? Zusätzlich werden Risiken ausfindig gemacht, die nicht ausreichend vom Messnetz berücksichtigt werden. Die Unsicherheitsanalyse des IST-Messnetzes (3) untersucht, wie unsicher die Daten und Annahmen sind, auf die sich die Analyse des IST-Messnetzes stützt. Die größten Unsicherheiten treten erfahrungsgemäß bei der Gefährdungsanalyse durch unbekannte Gefährdungen, die Verschiedenheit hydraulischer Szenarien und unbekannte transportspezifische Parameter (v. a. transversale Dispersivität) auf. Können diese Unsicherheiten minimiert werden, so entwickeln die Ergebnisse der Analyse des IST-Messnetzes eine starke Aussagekraft.

In der Optimierung des IST-Messnetzes (4) werden die Fragen beantwortet: Wo müssen neue Messstellen gebaut werden, um alle Risiken zu überwachen? Wo kann das Messnetz gezielt ausgedünnt werden, um Kosten zu sparen? Reichen der derzeitige Beprobungsumfang und das Beprobungsintervall aus? Durch mul-

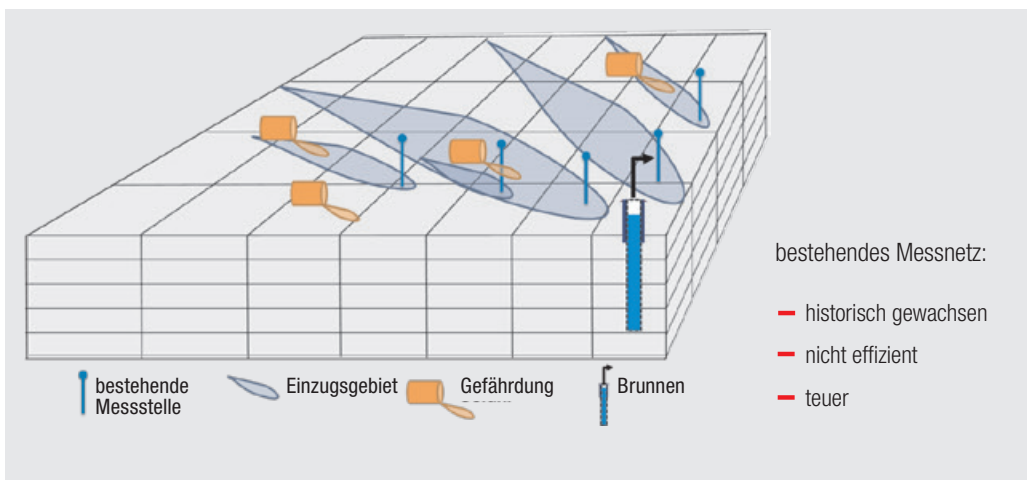


Abb. 1: IST-Messnetz: Die zweite und vierte Messstelle überwachen keine Gefährdung.

Quelle: LW

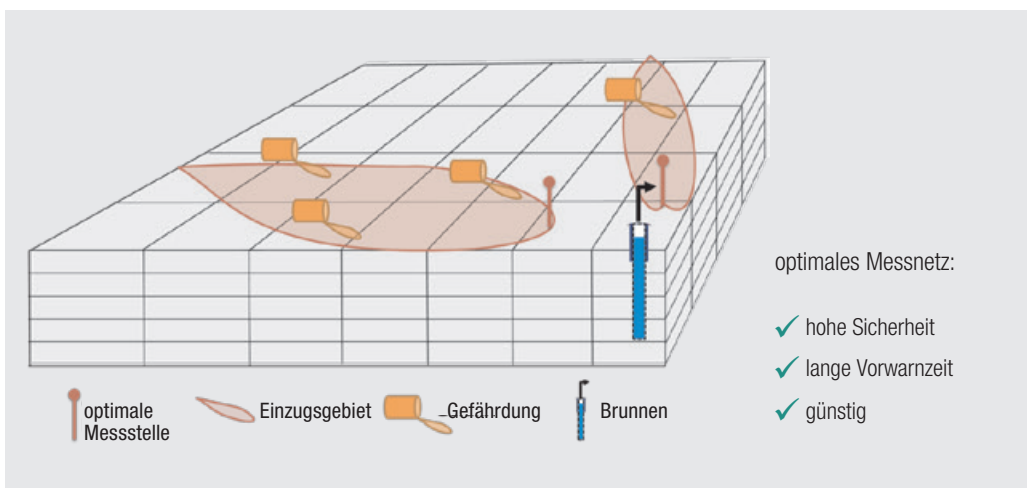
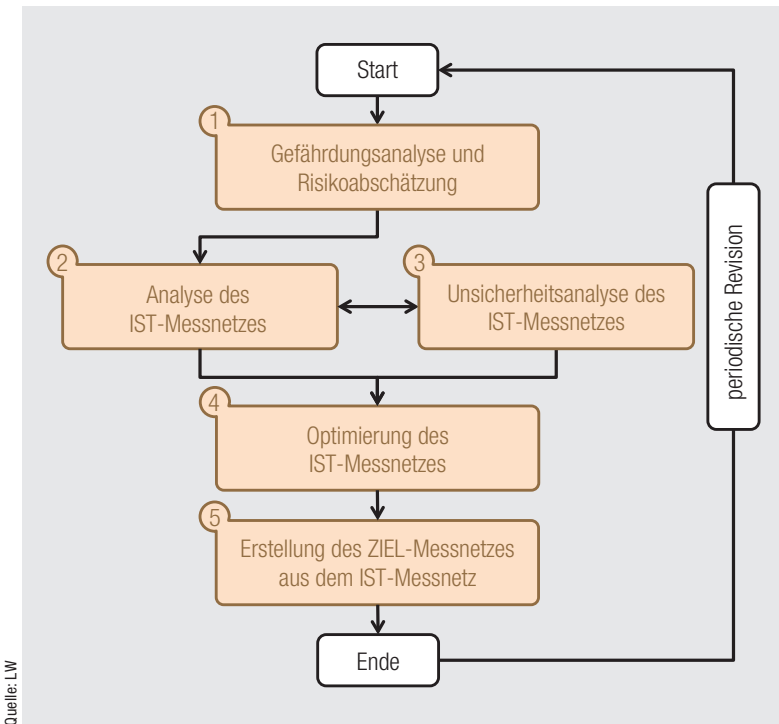


Abb. 2: Beispiel eines optimierten Messnetzes

Quelle: LW



Quelle: LW

Abb. 3: Schritte zur Optimierung eines Messnetzes

tikriterielle Optimierungsverfahren können diese Fragestellungen systematisch und effizienter als bei einer händischen Suche realisiert werden. Für die Erstellung eines optimierten ZIEL-Messnetzes (5) aus dem IST-Messnetz muss ein Maßnahmenplan aufgestellt werden. Es wird die Frage beantwortet, welche Maßnahmen die größten Verbesserungen des Messnetzes bewirken und welche am kosteneffizientesten sind.

**Kern des F&E-Vorhabens: das neue Werkzeug**

Für die quantitative Analyse und Optimierung des IST-Messnetzes fehlt bisher eine entsprechende Software, die den Wasserversorger bei der Risikobeherrschung durch Messnetze unterstützt. Diese Software, genannt „Werkzeug“, wurde von den Projektpartnern an der Universität Stuttgart entwickelt. Das Werkzeug benötigt eine Datei mit Angaben zu den Messstellen, eine Datei mit Angaben zu den Gefährdungen und Dateien mit Strömungsfeldern aus einem numerischen Strömungsmodell. Die Analyse und Optimierung von Messnetzen sollte wegen unterschiedlicher Anströmrichtungen und -geschwindigkeiten auf mehreren hydraulischen Szenarien (z. B. HW/NW, HQ/NQ) basieren. Das Werkzeug erstellt ein 3D-Strömungsfeld, berechnet über die „Reverse-Particle-Tracking-Random-Walk“-Methode das Einzugsgebiet der Brunnen und bestimmt über eine Vorwärtsrechnung die Durchbruchskur-

ven der Schadstofffahnen der Gefährdungen in jeder Zelle. Damit können die Detektionswahrscheinlichkeit und der sogenannte Nutzen der Vorwarnzeit des IST-Messnetzes und der Pareto-optimalen Messnetze berechnet werden.

Empfehlenswert für die Bewertung und Optimierung eines Messnetzes ist eine Risikoabschätzung nach [1]. Für eine quantitative Analyse und Optimierung unter Verwendung des Werkzeuges ist ein numerisches Strömungsmodell, das Betriebssystem Windows 7 (oder höher) sowie ein ausreichend leistungsstarker Rechner (64-Bit, Dual-Core Prozessor, 8 GB Arbeitsspeicher) notwendig.

**Analyse des IST-Messnetzes**

Hierbei wird die Qualität des Messnetzes anhand der drei Zielwertfunktionen Detektionswahrscheinlichkeit, Nutzen der Vorwarnzeit und Kosten bewertet. Die Zielwertfunktion Detektionswahrscheinlichkeit (DetW) gibt Auskunft darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Gefährdungen eines Untersuchungsgebietes durch das Messnetz detektiert werden können. Eine Gefährdung gilt als detektiert, wenn mindestens eine Messstelle innerhalb der potenziellen Schadstofffahne dieser Gefährdung liegt, wenn die Messstelle auf den Schadstoff der Gefährdung ausreichend häufig beprobt wird und in der Probe die schadstoffspezifische Bestimmungsgrenze überschritten wird.

Die Vorwarnzeit ist vereinfacht gesagt die Zeitspanne, die eine Schadstofffahne von einer Messstelle zum Brunnen benötigt. Die Angabe der Vorwarnzeit zur Bewertung eines Messnetzes ist noch nicht ausreichend. Beispielsweise hat der Anstieg der Vorwarnzeit einer Gefährdung von ein auf zwei Jahre für ein Wasserversorgungsunternehmen einen deutlich größeren Nutzen als ein Anstieg von 20 auf 21 Jahre. Deshalb wird die Vorwarnzeit mit einem zugeordneten Nutzen über eine stückweise linear definierte Funktion verknüpft. Die resultierende Zielwertfunktion ist der „Nutzen der Vorwarnzeit“ (NVwz).

Die Zielwertfunktion „Kosten“ umfasst Betriebskosten (für Probenahme, Analyse, Instandhaltung) und bei der Optimierung auch die Investitionskosten (für Neubau [€/m Tiefe] und Stilllegung von Messstellen).

Eine Analyse des IST-Messnetzes mit nur drei Zielwertfunktionen ist sehr pauschal. Deshalb wurde ein Ampelkonzept eingeführt, bei dem jede Risikoklasse (gering, mittel, hoch, unbekannt) separat mit DetW und NVwz bewertet wird (Abb. 4). Insgesamt werden damit vier Werte für die Detektionswahrscheinlichkeit, vier Werte für den Nutzen der Vorwarnzeit und ein Wert für die Betriebskosten erzielt. So kann das Messnetz risikobasiert und differenziert mit neun Werten bewertet werden.

Zur Bewertung des IST-Messnetzes wurde weiterhin der Begriff des Sicherheitsniveaus (SN) eingeführt. Je höher das Sicherheitsniveau, desto höher die Qualität des Messnetzes. Ein höheres Sicherheitsniveau kann nur erreicht werden, wenn alle Kriterien der niedrigeren Sicherheitsniveaus erfüllt sind. Für Sicherheitsniveaus kann per Nachkommastelle eine feinere Abstufung erreicht werden. Sind z. B. die Kriterien für Sicherheitsniveau 2 komplett und für Sicherheitsniveau 3 zu 50 Prozent erreicht, ist das SN = 2,5.

- SN 1: Das Rohwasser wird an den Rohwasserentnahmestellen auf die im Versorgungsgebiet auftretenden Schadstoffe beprobt.
- SN 2: Schadstofffahren vereinzelter Gefährdungen werden früher als an den Rohwasserentnahmestellen gesehen.
- SN 3: Schadstofffahren hoch riskanter Gefährdungen werden mindestens mit der Ziel-Detektionswahrscheinlichkeit und dem Ziel-Nutzen der Vorwarnzeit gesehen.
- SN 4: Schadstofffahren mittel riskanter Gefährdungen werden mindestens mit der Ziel-Detektionswahrscheinlichkeit und dem Ziel-Nutzen der Vorwarnzeit gesehen.
- SN 5: Schadstofffahren gering riskanter Gefährdungen werden mindestens mit der Ziel-Detektionswahrscheinlichkeit und dem Ziel-Nutzen der Vorwarnzeit gesehen.

„Ziel-Detektionswahrscheinlichkeit“ und „Ziel-Nutzen der Vorwarnzeit“ werden vom Wasserversorgungsun-

ternehmen für die Gefährdungen jeder Risikoklasse (hoch, mittel, gering) festgelegt und spiegeln den Anspruch des Wasserversorgers bezüglich der Detektion von Gefährdungen wider. Sie sind damit relative, WVU-spezifische Größen.

### Optimierung des IST-Messnetzes

Ein Messnetz, das alle Gefährdungen (Detektionswahrscheinlichkeit = 100 Prozent) sehr früh (Nutzen der Vorwarnzeit = 1) und mit sehr geringen Kosten überwacht, existiert nicht (blaue Kugel in Abb. 5). Dieses theoretische Optimum kann nicht erreicht werden, da sich die Optima der einzelnen Zielwertfunktionen teilweise gegenseitig ausschließen. Das Optimie-

rungsproblem ist multikriteriell, der Lösungsraum ist die sogenannte Pareto-Front. Dieser Sachverhalt ist vereinfacht für die drei Zielwertfunktionen Detektionswahrscheinlichkeit, Nutzen der Vorwarnzeit und Kosten in Abbildung 5 dargestellt. Pareto-optimale Messnetze (= rote Kugeln) werden vom Werkzeug berechnet und können in keiner Zielwertfunktion verbessert werden, ohne dabei mindestens eine andere Zielwertfunktion zu verschlechtern.

### Erstellung des optimierten ZIEL-Messnetzes aus dem IST-Messnetz

Hat sich der Wasserversorger für ein Pareto-optimales ZIEL-Messnetz entschieden, muss ein Maßnahmenplan

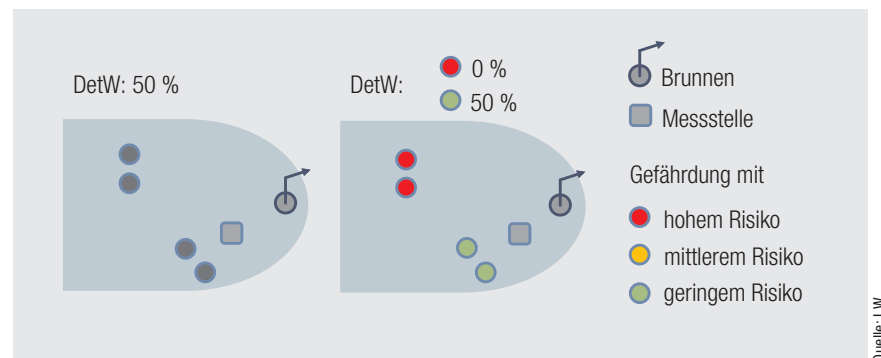


Abb. 4: Detektionswahrscheinlichkeit ohne (li.) und mit (re.) Ampelkonzept

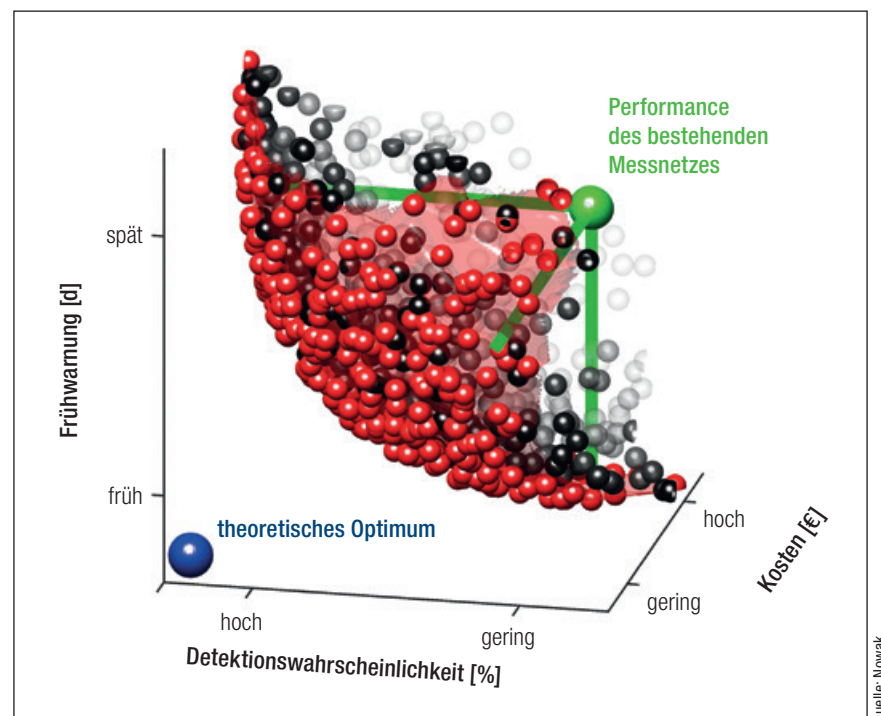
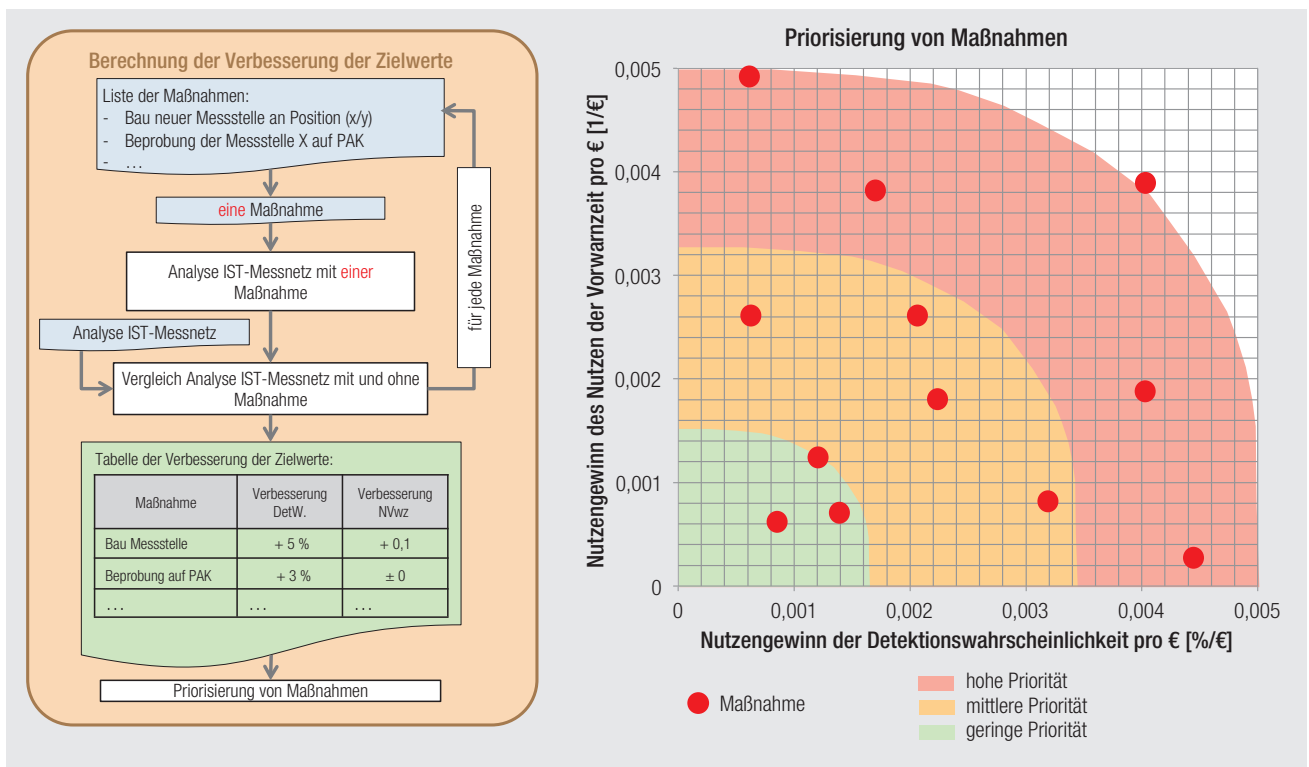


Abb. 5: Pareto-Front (rot) eines multikriteriellen Optimierungsproblems in 3D



Quelle: LW

Abb. 6: links: Fließbild zur Berechnung des Nutzensgewinns von Maßnahmen; rechts: Möglichkeit der Priorisierung von Maßnahmen

aufgestellt werden, wie das ZIEL-Messnetz aus dem IST-Messnetz entwickelt werden kann. Generell kann sich der Maßnahmenplan aus folgenden Maßnahmen zusammensetzen:

- Eignungsprüfung einer bestehenden Messstelle nach DVGW-Arbeitsblatt W 129
- Anpassung des Beprobungsumfangs einer bestehenden Messstelle
- Anpassung des Beprobungsintervalls einer bestehenden Messstelle
- vertikaler Ausbau/Vertiefung einer bestehenden Messstelle
- Stilllegung bzw. Rückbau einer bestehenden, nicht mehr benötigten Messstelle
- Inbetriebnahme einer bestehenden, nicht regelmäßig beprobten Messstelle
- Bau einer neuen Messstelle nach DVGW-Arbeitsblatt W 121 und Festsetzung des Beprobungsumfangs und Beprobungsintervalls

Sind die konkreten Maßnahmen zur Erstellung des ZIEL-Messnetzes definiert, muss festgelegt werden, in welcher Reihenfolge die Maßnahmen ab-

gearbeitet werden. Eine gleichzeitige Umsetzung aller Maßnahmen ist oft (z. B. aufgrund hoher Investitionskosten beim Bau neuer Messstellen) nicht möglich. Daher ist es sinnvoll, zuerst die Maßnahmen umzusetzen, die die größten Verbesserungen bei DetW und NVWz bewirken.

Um die Verbesserung zu quantifizieren, wird eine Analyse des IST-Messnetzes mit einer einzelnen umgesetzten Maßnahme durchgeführt. Ist die Maßnahme z. B. der Bau einer neuen Messstelle, so wird eine Analyse des IST-Messnetzes so durchgeführt, als wäre die Messstelle schon gebaut. Die Differenz der Zielwerte der ursprünglichen Analyse des IST-Messnetzes und der Analyse des IST-Messnetzes mit der Maßnahme entspricht der Verbesserung der Zielwerte durch diese Maßnahme (Abb. 6, links).

Die Priorisierung der Maßnahmen erfolgt über den Nutzensgewinn. Maßnahmen mit einem hohen Nutzensgewinn erhalten eine hohe Priorität und werden als Erstes umgesetzt. Die Priorisierung ist dem Was-

serversorgungsunternehmen vorbehalten. Der Nutzensgewinn kann auch im Verhältnis zu den Kosten, z. B. Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit pro Euro, beschrieben werden (Abb. 6, rechts).

### Zusammenfassung

Für die Bewertung und Optimierung des IST-Messnetzes wurden im F&E-Vorhaben eine quantitative und eine qualitative Methode entwickelt. Die Vorgehensweise nach **Abbildung 3** ist bei beiden Methoden identisch und bestätigt somit den universellen Charakter der neuen Konzepte. Für die quantitative Methode wurde eine neue Software (sog. „Werkzeug“) programmiert, die auf Basis des numerischen Strömungsfeldes das bestehende Messnetz anhand der Zielwertfunktionen Detektionswahrscheinlichkeit, Nutzen der Vorwarnzeit und Kosten bewertet. Auf Basis der Zielwertfunktionen wurde eine neuartige Kennzahl für das „Sicherheitsniveau“ eines Messnetzes entwickelt, mit der ein Wasserversorger die Güte seiner Messnetze für unterschiedliche Gebiete

miteinander vergleichen kann – eine nützliche Hilfe bei Entscheidungen im Management.

Das Werkzeug liefert bei der multikriteriellen Optimierung nicht ein optimales Messnetz, sondern sehr viele Pareto-optimale Messnetze. Somit ist erstmalig die Möglichkeit gegeben, dass ein Wasserversorger das für seine Zwecke optimale ZIEL-Messnetz aus den Pareto-optimalen Messnetzen finden kann (z. B. Messnetz mit möglichst guter Detektionswahrscheinlichkeit oder Messnetz mit möglichst geringen Kosten, aber hohem Nutzen der Vorwarnzeit). Das Ergebnis ist eine auf die Bedürfnisse des Wasserversorgungsunternehmens maßgeschneiderte Lösung.

Basierend auf den Zielwertfunktionen wurde ein neues Entscheidungshilfesystem entwickelt, wie aus dem IST-Messnetz das ZIEL-Messnetz erstellt werden kann. Für jede Maßnahme (z. B. den Bau einer neuen Messstelle) wird die Verbesserung berechnet, die diese Maßnahme mit sich bringt (z. B. Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit). Somit können systematisch und kosteneffizient zuerst die Maßnahmen umgesetzt werden, die die Qualität des Messnetzes am meisten verbessern.

Die Erfahrungen und Ergebnisse der am Projekt teilnehmenden Wasserversorger mit der quantitativen Analyse

und Optimierung sind im Endbericht des Projekts dargestellt. Dabei wurde der Nachweis erbracht, dass die Methode und das Werkzeug bei verschiedensten hydrogeologischen, numerischen und risikospezifischen Randbedingungen erfolgreich eingesetzt werden können. Alle vorgestellten Konzepte sind im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens enthalten, der über den DVGW bezogen werden kann. Der DVGW prüft zurzeit geeignete Wege, um auch das Werkzeug inklusive Benutzerhandbuch verfügbar zu machen.

Die qualitative Methode der Analyse und Optimierung von Messnetzen bedient sich des klassischen Handwerks mit Abschätzen des Einzugsgebietes der Grundwasserentnahmestellen und der Schadstofffahnen mithilfe von Grundwassergleichenplänen verschiedener hydraulischer Szenarien. In einem anschaulichen Leitfaden wurde die praktische Vorgehensweise der qualitativen Methode Schritt für Schritt erklärt und an einem Beispiel durchgeführt. Die im F&E-Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse mündeten in Empfehlungen zur Ergänzung des DVGW-Arbeitsblattes W 108. ■

#### Literatur

- [1] Technischer Hinweis – DVGW-Merkblatt W 1001-B2: „Sicherheit in der Trinkwasserversorgung – Risikomanagement im Normalbetrieb; Beiblatt 2: Risikomanagement für Einzugsgebiete von Grundwasserfassungen zur Trinkwassergewinnung“, März 2015.
- [2] DVGW F&E-Vorhaben W 1/01/10 „Risikomanagement für Wasserschutzgebiete“ (2013)

## Die Autoren

**Dr.-Ing. Martin Emmert** ist stellvertretender Technischer Geschäftsführer der Landeswasserversorgung und Leiter der Abteilung Zentrale Technische Dienste und Wasserwirtschaft.

**Dipl.-Ing. Niklas Zigelli** war der projektleitende Ingenieur bei der Landeswasserversorgung.

**Prof. Dr.-Ing. Frieder Haakh** ist Technischer Geschäftsführer der Landeswasserversorgung.

**Dipl.-Ing. Felix Bode** ist Doktorand am Lehrstuhl für stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme des Institutes für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart.

**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak M.Sc.** ist Professor am Lehrstuhl für stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme des Institutes für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart.

#### Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Frieder Haakh  
Zweckverband Landeswasserversorgung  
Technischer Geschäftsführer  
Schützenstr. 4, 70182 Stuttgart  
Tel.: 0711 2175-1210  
E-Mail: haakh.f@lw-online.de  
Internet: www.lw-online.de



## Die Augustausgabe der bbr (08-2016) enthält ein Spezial zum Thema „Bohrtechnik/Spezialtiefbau“ und Fachbeiträge u. a. zu folgenden Themen:

Ausbau des französischen Gaspipeline-Netzes

Lückenschluss U5 in Berlin: Leitungs- und Spezialtiefbau an der Museumsinsel

Regelkonforme Grundwasserprobenahme

Kostenloses Probeheft unter [info@wvgw.de](mailto:info@wvgw.de)