

13 ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

13.1 Zusammenfassung der Forschungsarbeiten

Das Wasserdargebot in Wassergewinnungsgebieten wird durch unterschiedliche Interessensgruppen genutzt. Neben den Wasserversorgungsunternehmen sind dies die Landwirtschaft und der Naturschutz. Auch die Bebauung von Flächen im Einzugsgebiet eines Wassergewinnungsgebiets kann im Hinblick auf die Grundwasserstände oder die Wasserqualität eine weitere Rolle spielen. Von diesen Interessensgruppen werden verschiedene Ansprüche an die Nutzung der vorhandenen Grundwasserressourcen gestellt, so dass sich Interessenskonflikte ergeben.

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes „Optimierung des Gebietswasserhaushalts in Wassergewinnungsgebieten“ wurde am Beispiel des Wassergewinnungsgebiets Donauried bei Ulm eine Lösungsstrategie für eine gerechte und nachhaltige Nutzung von Grundwasserressourcen aufgezeigt. Dazu wurden im Vorfeld des Forschungsprojektes von der Arbeitsgruppe „Nutzungskonzept württembergisches Donauried“ alle Flächen einer prioritären Nutzung durch die Wasserversorgung, die Landwirtschaft oder den Naturschutz zugeordnet und so eine räumliche Entflechtung der Nutzungsinteressen erreicht. Dies war ein sehr wichtiger Schritt, da eine Verbesserung z.B. der Grundwasserstände bzw. Flurabstände nur möglich ist, wenn die Bewertungsgrößen für größere zusammenhängende Flächen vorliegen. Eine zerstückelte Flächenaufteilung erschwert die Möglichkeit der Optimierung, da sich auf kleinstem Raum widersprechende Anforderungen an den Grundwasserstand aufgrund von unterschiedlichen Zielfunktionen ergeben können.

Weitere Grundlage der im Donauried durchgeführten Forschungsarbeiten war die umfangreiche Datengrundlage, die einerseits ein sehr dichtes Netz an Grundwassermessstellen und andererseits vergleichsweise lange Datenreihen (bis Anfang des 20. Jahrhunderts) aufweist. Aufbauend auf diesen Messinformationen wurde ebenfalls im Vorfeld des Forschungsprojektes ein numerisches Grundwassermodell erstellt und für stationäre sowie instationäre Prozesse geeicht, so dass sich die natürlichen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Donaurieds nachbilden lassen. Dieses Grundwassermodell wurde im Rahmen des Forschungsprojektes verwendet, um unterschiedliche Entnahmeszenarien zu untersuchen und die Grundwasserstände für die Bewertung der Szenarien zu bestimmen.

Mit den o.g. Vorarbeiten und bestehenden Werkzeugen wurde im Forschungsprojekt zunächst ein umfassendes, neuartiges Bewertungssystem entwickelt. Der Vergleich unterschiedlicher Bewertungsverfahren hat gezeigt, dass die einfache Nutzwertanalyse (NWA) für die anstehenden Fragestellungen grundsätzlich gut geeignet ist. Aufgrund der Möglichkeiten zur Steuerung der Kompensierbarkeit unterschiedlicher Bewertungen einzelner Nutzungs-

gruppen wurde aber die Weiterentwicklung der NWA, das sogenannte Composite Programming (CP) als Bewertungsverfahren ausgewählt. Das CP zeichnet sich gegenüber anderen Bewertungsverfahren durch folgende Vorteile aus:

- Klare und nachvollziehbare Bewertung durch hierarchischen Aufbau des Zielsystems
- Berücksichtigung aller relevanter Bewertungskriterien
- Robustheit der Ergebnisse bei wiederholten Bewertungen
- Kein Einfluss neuer Alternativen auf das Bewertungssystem und bisherige Bewertungen
- Sehr gute Anpassungsfähigkeit an die Fragestellung der Grundwasserbewirtschaftung

Dieses Bewertungssystem wurde zunächst für stationäre Strömungsverhältnisse am Beispiel des Donaurieds aufgebaut. Dazu wurden die Bewertungsgrößen Flurabstand, Wasserqualität und Kosten der Wassergewinnung und -aufbereitung ausgewählt. Den Bewertungsgrößen wurden Zielfunktionen zugeordnet, die die optimalen, suboptimalen und schlechten Bereiche der einzelnen Bewertungsgrößen widerspiegeln. Innerhalb des Bewertungssystems werden anhand der Zielfunktionen und des Zielsystems die Zielerfüllungsgrade, Teilnutzwerte und der Gesamtnutzwert berechnet. Diese Nutzwerte ermöglichen den Vergleich unterschiedlicher Varianten. Zusammen mit den Ergebnissen von systematischen Modellberechnungen mit unterschiedlichen Entnahmen wurde ein Leitfaden für die Bewirtschaftung des Grundwasserleiters im Donauried erarbeitet.

In einem weiteren Schritt wurde das stationäre Bewertungssystem mit einem Optimierungsalgorithmus gekoppelt. Dadurch wurde ein Managementsystem erstellt, mit dem sich die Grundwasserentnahmen in einem Wassergewinnungsgebiet so optimieren lassen, dass sich für alle Nutzungsgruppen die bestmöglichen Verhältnisse im Wassergewinnungsgebiet einstellen. Im mathematischen Sinne bedeutet dies, dass ein größtmöglicher Gesamtnutzwert entsteht. Dies wird durch eine nichtlineare Optimierung erreicht, die auf der Gauss-Marquardt-Levenberg-Methode basiert. Das Managementsystem wurde allgemein gültig aufgebaut, so dass es für jedes Wassergewinnungsgebiet eingesetzt werden kann. Das Managementsystem „Groundwater Resources Management“ (GRM) verwendet das entwickelte Bewertungssystem nach der NWA oder dem CP. Die Strömungsverhältnisse werden mit einem Grundwassermodell berechnet, das ebenfalls in GRM aufgebaut werden kann, oder mit einem bereits bestehenden Modell, das über eine Schnittstelle gekoppelt wird. Mit dem neu entwickelten Managementsystem wurden Optimierungsrechnungen durchgeführt und beispielhaft für das Donauried die optimale Entnahmeverteilung an den 6 Fassungen für stationäre Strömungsverhältnisse bestimmt.

Da die natürlichen Verhältnisse zeitlichen Schwankungen unterliegen, wurde das bestehende stationäre Bewertungs- und Managementsystem für instationäre Prozesse erweitert. Dazu wurden zunächst instationäre Zielfunktionen für das Bewertungssystem ermittelt. Diese berücksichtigen die während eines Jahres natürlicherweise auftretenden Schwankungen des Flurabstands sowie den aktuellen Wasserversorgungsgrad im Boden. Diese instationären Zielfunktionen wurden dazu verwendet, die bisherigen Verhältnisse im Donauried zwischen 1993 und 1999 zu beurteilen.

Das instationäre Optimierungssystem wurde beispielhaft für den Zeitraum November 1998 bis April 1999 eingesetzt und die dynamische optimale Entnahmeverteilung ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass nicht nur die Verteilung der Entnahme verbessert, sondern auch derselbe Gesamtnutzwert mit einer um ca. 20 % höheren Grundwasserentnahme als die tatsächliche im Betrachtungszeitraum erreicht werden kann. Dieses instationäre Optimierungssystem lässt sich auch zu einem Managementsystem ausbauen, mit dem die Entnahmen in einem Wassergewinnungsgebiet vorausschauend im Sinne einer nachhaltigen Nutzung geplant werden können. Dies wurde exemplarisch für einen Prognosemonat aufgezeigt, der sich an den instationären Optimierungszeitraum anschließt.

Mit Abschluss des Forschungsprojektes liegt somit ein allgemein gültiges Managementsystem vor, dessen programmtechnische Realisierung das System „Groundwater Resources Management“ in Form eines Prototyps ist. Für das Donauried selbst steht ein lauffähiges Bewertungs- und Optimierungssystem zur Verfügung.

13.2 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Methoden zur Bewertung und Optimierung von Grundwasserentnahmen in Wassergewinnungsgebieten entwickelt. Für die Anwendung dieser Methoden lassen sich allgemein gültige Empfehlungen sowie Schlussfolgerungen für das Donauried ableiten.

Empfehlungen für die allgemeine Vorgehensweise bei der Optimierung von Grundwasserentnahmen

- **Festlegung von prioritären Flächennutzungen:** Bevor ein Bewertungs- und Optimierungssystem erstellt wird, sollte innerhalb eines Nutzungskonzeptes die bestehende heterogene Nutzungsstruktur in einem Wassergewinnungsgebiet ermittelt und - wenn möglich - entflochten werden. Das bedeutet, dass großräumige, zusammenhängende Schwerpunktbereiche, ggf. mit unterschiedlichen Wertstufen ausgewiesen werden.
- **Ermittlung der Ansprüche der einzelnen Nutzer an den Wasserhaushalt und Erstellung von Zielfunktionen:** Für die einzelnen Nutzer des Gebietswasserhaushalts ist der spezifische Wasserbedarf in Abhängigkeit von der Zeit zu ermitteln. Dazu müssen die relevanten Bewertungsgrößen identifiziert werden. Für die Landwirtschaft und den Naturschutz eignet sich der Flurabstand. Für die landwirtschaftlichen Flächen und Naturschutzflächen im Donauried wurden Zielfunktionen für den Flurabstand ermittelt, die auch Anhaltswerte für weitere Gewinnungsgebiete liefern. Im Detail sind diese mit Fachleuten an die lokalen Verhältnisse anzupassen. Bei der Erstellung der Zielfunktionen ist wichtig, dass diese auf den Erhalt bzw. die Verbesserung der derzeitigen Situation in Naturschutzflächen abzielen und keine unrealistischen Zielvorgaben gestellt werden. Die Bewertungsgrößen der Wasserversorgung hängen von den spezifischen Kosten durch die Wassergewinnung und -aufbereitung sowie den Rohwasserqualitäten der einzelnen Ge-

winnungsanlagen ab und sind fallspezifisch zu ermitteln. Auch für die Wasserversorgung kann der Flurabstand als Bewertungsgröße eine Rolle spielen.

- **Aufstellen eines Bewertungssystems:** Es hat sich gezeigt, dass ein hierarchisch strukturiertes Zielsystem am besten geeignet ist. Um extrem unterschiedliche Bewertungen einzelner Nutzungsgruppen besser berücksichtigen zu können, wird die Verwendung von Composite Programming empfohlen, wobei ein Kompensationsfaktor > 1 nur auf der Zielebene 2 angewendet werden sollte. Die Wichtung der einzelnen Bewertungsgrößen und Gruppen ist zunächst frei wählbar. Für eine ausgeglichene Bewertung wird eine gleichmäßige Gewichtung auf der Zielebene 2 vorgeschlagen, auf der Zielebene 3 kann die Gewichtungsverteilung durch die unterschiedlichen Nutzer erfolgen.
- **Optimierung der Entnahmen:** Um Alternativen abwägen zu können, müssen die Grundwasserverhältnisse für unterschiedliche Entnahmeszenarien prognostiziert werden. Dazu eignet sich nur ein prognosefähiges Grundwassermodell, das anhand von ausreichend Messdaten geeicht wurde. Für sehr einfache hydrogeologische Verhältnisse können auch prinziphafte Modelle zum Einsatz kommen.
- **Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik:** Die zeitliche Dynamik spielt zwar bei der Grundwasserströmung eine Rolle, die entwickelten Zielfunktionen lassen sich aber problemlos auf stationäre mittlere hydrologische Verhältnisse anwenden. Das bedeutet, dass der Einsatz eines dynamischen Managementsystems nur dann erforderlich ist, wenn die hydrologisch bedingten Grundwasserstände zwischen dem Minimum und dem Maximum der Grenzflurabstände schwanken. In diesem Fall hängt das Optimierungspotenzial einer Grundwasserentnahme von den hydrologischen Verhältnissen ab.
- **Überprüfung der vorab festgelegten prioritären Flächennutzung:** Mit dem Bewertungs- und Optimierungssystem lassen sich diejenigen Bereiche identifizieren, in denen die gestellten Anforderungen an den Flurabstand durch eine optimierte Grundwasserbewirtschaftung nicht erfüllt werden können. Diese Bereiche können u.U. einer anderen prioritären Nutzung zugeordnet werden. Die Optimierungsrechnungen müssen in diesem Fall erneut durchgeführt werden.

Schlussfolgerungen für das Donauried

- **Anwendbarkeit des Bewertungssystems:** Das Bewertungssystem hat sich für die Anwendung im Donauried bewährt. Die Zielfunktionen liefern aussagekräftige Teilnutzwerte für den Naturschutz und die Landwirtschaft. Für die Wasserversorgung ist dies etwas differenzierter zu sehen:
 - Der Bewertungsparameter ‚Nitrat‘ (Gewichtung: 30%) ist sehr stark von der Rohwasserqualität abhängig, bei der instationären Optimierung spielt dieser Parameter deshalb eine umso größere Rolle, da die Konzentrationsschwankungen mit einer optimierten Entnahme ausgeglichen werden können.

- Da der Bewertungsparameter ‚Kosten‘ (Gewichtung: 20%) nur von der Entnahme an der Fassung 4 abhängt, ergeben sich hier sehr große Schwankungen bei der Bewertung einzelner Entnahmevarianten.
 - Der Bewertungsparameter ‚Härte‘ (Gewichtung: 30%) ist sehr stark von der Aufbereitung abhängig. Hinsichtlich des Betriebs der EC-Anlage wurden vergleichsweise viele Annahmen getroffen. Ggf. ist auf diesen Parameter zu verzichten oder durch einen anderen (z.B. DOC) zu ersetzen.
 - Der Bewertungsparameter ‚Vermeidung von Auswaschungen‘ (Gewichtung: 20%) ist vom Flurabstand abhängig. Damit lässt sich dieser Parameter genauso gut in das Bewertungssystem einbinden wie die Bewertungsgrößen der Landwirtschaft und des Naturschutzes.
-
- Bisherige Bewirtschaftung: Die generelle bisherige Bewirtschaftung sollte wie folgt umgestellt werden: An den Fassungen 1 und 6 sollte bis zur maximalen Ergiebigkeit Grundwasser entnommen werden. Die Entnahme an diesen Fassungen hat unter mittleren Bedingungen praktisch keine Auswirkung auf Landwirtschaft und Naturschutz. Demgegenüber sollten die Entnahmen an den Fassungen 2 und 3 soweit als möglich gedrosselt werden, wobei bei höherer Gesamtentnahme aus der Fassung 2 tendenziell mehr entnommen werden kann als aus der Fassung 3. Aus der Fassung 5 sollte ebenfalls wenig entnommen werden, da dies negative Einflüsse auf den Naturschutz und die grundwasserabhängigen Anmoorflächen im Gebiet hat. Die Kostensteigerung durch Entnahme an Fassung 4 muss teilweise in Kauf genommen werden, da sich Absenkungen in diesem Bereich positiv auf landwirtschaftliche Schwerpunktfächen auswirken. Allgemein kann ausgesagt werden, dass alle drei Interessensgruppen von einer optimierten Entnahmeverteilung profitieren.
 - Die Naturschutzfläche westlich der Nau zwischen den Fassungen 3 und 5 schränkt die Entnahmen aus diesen Fassungen stark ein. Die Modellrechnungen haben gezeigt, dass auch ohne Entnahme an diesen Fassungen die Zielvorstellungen des Naturschutzes auf dieser Fläche kaum zu verwirklichen sind. Die optimierte Grundwasserbewirtschaftung stellt daher kein geeignetes Mittel dar, das Vernässungsziel für diese Flächen zu erreichen. Es ist daher in Absprache mit den Naturschutzverbänden zu prüfen, ob ggf. andere Zielfunktionen bzw. Gewichtungen für die Flächen der Naturschutz-Wertstufe 2 möglich sind.
 - Optimierungspotenzial: Die Berechnungen mit dem Optimierungssystem haben gezeigt, dass sich der Gesamtnutzwert gegenüber der derzeitigen Situation noch deutlich steigern lässt. Für die weitere Vorgehensweise bedeutet dies, dass mit Hilfe eines dynamischen Managementsystems die Entnahmen gesteuert werden sollten. Weitergehende stationäre Optimierungsrechnungen sind nicht zielführend, da der Grundwasserleiter so großen hydrologischen Schwankungen unterworfen ist, dass stationäre Aussagen nur zu einzelnen mittleren Situationen möglich sind.

- **Dynamisches Managementsystem:** Das entwickelte dynamische Managementsystem hat sich im Rahmen des Projektes sehr gut bewährt. Die praktische Anwendung muss nun zeigen, inwieweit dieses aus Sicht des Wasserwerksbetriebs und der Unsicherheiten im Hinblick auf die hydrologischen Verhältnisse aussagekräftige Prognosen liefert, die in die Praxis umgesetzt werden können.

13.3 Ausblick

Methodische Weiterentwicklungen für das Bewertungs- und Optimierungssystem sind nach Abschluss des Forschungsprojektes nicht mehr notwendig. Der bestehende Prototyp des Managementsystems GRM ist auf seine praktische Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit zu testen. Dies ist durch die Anwendung des dynamischen Managementsystems auf das Donauried ab 2005 gegeben. In monatlichen Fortschreibungen werden optimale Entnahmeverteilungen für die Fassungen im Donauried ermittelt. Dazu müssen die aktuellen hydrologischen Verhältnisse in das Grundwasserströmungsmodell laufend eingebunden werden. Im Rahmen dieses Testbetriebs lassen sich auch die wasserwirtschaftlichen Bewertungsgrößen weiter überprüfen. Dies gilt insbesondere für die Härte.

Im Rahmen des weitergehenden Einsatzes des instationären Managementsystems ist die im Forschungsprojekt entwickelte Verteilung der Gewichtungsfaktoren zu überprüfen. Ggf. werden im praktischen Einsatz verschiedene Gewichtungsverteilungen zu untersuchen sein.

Im bestehenden Prototyp von GRM ist auch die Berücksichtigung von Transportprozessen vorgesehen. Es ist zu prüfen, ob eine Modellierung der Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter das Managementsystem verbessert. Derzeit werden die Nitratkonzentrationen des Rohwassers aus Messungen abgeleitet. Eine Veränderung der Nitratkonzentrationen durch Entnahmeumstellung wird bislang nicht berücksichtigt. Dazu müsste das Strömungsmodell mit einem Nitrattransportmodell gekoppelt werden.

Eine Anwendung des dynamischen Managementsystems auf sehr große Grundwasservorkommen, wie z.B. den Oberrheingraben mit unterschiedlichen Wasserversorgungsunternehmen, ist zu empfehlen, da hier nicht nur die Landwirtschaft und der Naturschutz als Nutzungsgruppe vorhanden sind, sondern auch Probleme im Zusammenhang mit Siedlungen bestehen. Es ist zu prüfen, ob das Managementsystem dann als Grundlage für einen jährlich variierenden Bewirtschaftungsplan dienen kann.

Das neu entwickelte Bewertungs- und Optimierungssystem ist für die Umsetzung der Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie zur Erreichung eines guten mengenmäßigen Zustands des Grundwassers im Umfeld von Grundwassergewinnungsanlagen geeignet. Die von LENKENHOFF & ROSE (2003) ermittelten äußeren Grenzen des Flurabstand sollten hierfür in das Bewertungssystem integriert und das Managementsystem am Beispiel weiterer Wassergewinnungsgebiete getestet werden.