

12 ÜBERTRAGBARKEIT DER ENTWICKLUNGEN

12.1 Übersicht

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde zunächst ein Bewertungsverfahren für stationäre Verhältnisse entwickelt und mit einem Optimierungssystem gekoppelt. Die Methodenentwicklung erfolgte allgemein in einer neuen Software, die auch auf andere Wassergewinnungsgebiete angewendet werden kann. Auch das entwickelte instationäre Bewertungssystem und die Optimierung für instationäre Verhältnisse lassen sich auf andere Wassergewinnungsgebiete anwenden. Das Bewertungs- und Optimierungssystem wurde auf das vergleichsweise komplexe Einzugsgebiet der Fassungen des Zweckverbandes Landeswasserversorgung im Donauried angewendet. In dem gewählten Untersuchungsraum liegt einerseits eine hervorragende und sehr dichte Datenbasis für die zu bearbeitenden Fragestellungen vor und andererseits existiert ein geeichtes instationäres Grundwasserströmungsmodell, mit dem sich die Grundwasserströmungsverhältnisse quantifizieren und für verschiedene Entnahmesituationen prognostizieren lassen. Dies sind optimale Voraussetzungen, die insbesondere in kleineren Wassergewinnungsgebieten nicht gegeben sind. Deshalb ist es notwendig, zum Abschluss der Forschungsarbeiten, auch die erforderliche Datengrundlage und die damit verbundene Aussageschärfe eines Grundwassermanagements zu diskutieren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zunächst die notwendigen Algorithmen und Strategien am Beispiel des Donaurieds entwickelt. Für die allgemeine Anwendbarkeit des Managementsystems werden die gewonnenen Erkenntnisse in eine anwenderfreundliche Software überführt. Dazu erfolgte die Entwicklung des Programmsystems „Groundwater Resources Management – GRM“. Eine erster Prototyp von GRM wurde im Rahmen des Forschungsprojektes erstellt und getestet. Eine weitergehende Entwicklung bis zur Marktreife ist vorgesehen. Es wurden bereits Anwendungen für das Donauried mit dem Programmsystem GRM durchgeführt.

12.2 Diskussion der Datengrundlage

Bei der erforderlichen Datenlage ist zunächst zwischen den Daten für die Erstellung des Bewertungssystems und außerdem für die Entwicklung von Methoden zur Prognose der Grundwasserströmungsverhältnisse zu unterscheiden. Wie sich in dem Forschungsprojekt gezeigt hat, ist eine abgesicherte Prognose der Strömungsverhältnisse bei komplexen geologischen Verhältnissen nur mit Hilfe eines geeichten Grundwasserströmungsmodells möglich, so dass für den Aufbau, die Modelleichung und den Betrieb eines Grundwasserströmungsmodells entsprechende Daten benötigt werden.

Die Datengrundlage für den Aufbau des Bewertungssystems kann für unterschiedliche Untersuchungsgebiete sehr heterogen sein. Da aber ein wesentlicher Teil der Bewertung und der Optimierung in der Zuordnung von Flächen zu einzelnen Bewertungsgruppen liegt, muss in jedem Fall eine Flächennutzungskartierung vorliegen. Darüber hinaus sollte eine weitergehende Zuordnung der einzelnen Flächen im Rahmen eines Nutzungskonzeptes zur Entflechtung der Bewertungsflächen mit Ausweisung von Schwerpunktbereichen erfolgen. Dadurch ist es möglich, die vom Grundwasser bestimmten Flurabstände im Rahmen der Optimierung eindeutig einer Nutzungsgruppe bzw. einer Bewertungsgruppe zuzuordnen. Neben den im Donauried definierten Flächen für Landwirtschaft, Naturschutz und Wasserversorgung können auch Siedlungsflächen mit geringen Flurabständen, in denen der Grundwasserstand oberhalb der Kellersohle der Bauwerke aufsteigen kann, eine wichtige Rolle spielen. Die Anwendung des Bewertungs- und Optimierungssystems im Donauried hat auch gezeigt, dass eine Zuordnung von möglichst zusammenhängenden Teilflächen zu den Nutzungsgruppen zu einem eindeutigeren Optimierungsergebnis führt als eine sehr zersplitterte Flächenaufteilung, die sehr heterogen im Untersuchungsraum verteilt ist.

Für die Bestimmung der Zielfunktionen der einzelnen Bewertungsgrößen wurden im Donauried sehr umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Damit liegen zumindest für einige wichtige Pflanzengemeinschaften in feuchten und moorigen Flächen Anhaltswerte vor, die auf andere Standorte übertragen werden müssen. Ebenso wurden Zielfunktionen für landwirtschaftlich intensiv genutzte Flächen entwickelt, die in Abhängigkeit der vorhandenen Böden auch auf andere Gebiete überführt werden können. Geht man davon aus, dass in anderen Untersuchungsgebieten der Untersuchungsaufwand eher geringer ist als im Donauried, dann lässt sich aus der durchgeführten Sensitivitätsstudie zum Bewertungssystem (siehe Kap. 7.6.4) folgendes ableiten: Ein vereinfachtes Bewertungssystem führt nach den Ergebnissen im Donauried zu ähnlichen Ergebnissen (optimale Entnahmeraten) bei der Optimierung der Grundwasserentnahmen wie ein komplexes. Die Nutzwerte eines vereinfachten Bewertungssystems unterscheiden sich allerdings deutlich von denen eines komplexen Bewertungssystems. Das bedeutet, dass der Detaillierungsgrad der Daten einen geringeren Einfluss auf das Optimierungsergebnis hat als auf die Bewertung bzw. Ermittlung der Teilnutzen. Sollte es notwendig sein, verschiedene Wasserversorgungsgebiete miteinander zu vergleichen oder mehrere Wassergewinnungsgebiete hinsichtlich Auswirkungen zu vergleichen, so muss dasselbe Bewertungssystem angewendet werden. Dies erfordert aber auch denselben Detaillierungsgrad und dieselbe Untersuchungstiefe hinsichtlich der Bewertungsgrößen. Ggf. lassen sich hierfür auch Standards erarbeiten, die eine breite Anwendung finden können. Ein erster Vorschlag liegt mit der vorliegenden Untersuchung vor.

Tab. 12.1: Übersicht über die erforderlichen Datengrundlagen, deren Verwendung im Bewertungssystem und Verfügbarkeit

| Datengrundlage | Verwendung im Bewertungssystem | Verfügbarkeit |
|----------------------------|--|---|
| Bodentypen | <ul style="list-style-type: none"> • Beurteilung der Grundwasserabhängigkeit der Fläche • Berechnung von Grenzflurabständen für die Zielfunktionen | <ul style="list-style-type: none"> • Bodenkarten der Geologischen Landesämter |
| Bodenarten | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung von Grenzflurabständen für die Zielfunktionen | <ul style="list-style-type: none"> • Bodenkarten der Geologischen Landesämter • Bodenschätzungskarten der Geologischen Landesämter und Finanzämter |
| Biototypen | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung von Grenzflurabständen für die Zielfunktionen | <ul style="list-style-type: none"> • Biotopkartierungen der Landkreise, teilw. zentral bei den Umwelt-Landesämtern verfügbar (z.B. BY, BW, NS); Datengrundlagen oft älter als 5 Jahre oder noch nicht abgeschlossen eigene Kartierung notwendig! • Auswertung von Orthophotos |
| Nutzung | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung von Grenzflurabständen für die Zielfunktionen | <ul style="list-style-type: none"> • ATKIS Basis-DLM • ALK/ALB • Auswertung von Orthophotos |
| Vorrangbereiche | <ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung der Zielfunktionen • Festlegung der Gewichtungsfaktoren | <ul style="list-style-type: none"> • Kompromissfindung auf Grundlage von Vorrang- und Vorsorgegebieten in Regionalplänen und rechtlich ausgewiesenen Schutzgebieten |
| Geländehöhe | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung von Flurabständen | <ul style="list-style-type: none"> • Digitale Höhenmodelle oder Geländemodelle der Landesvermessungsämter |
| Rohwasserqualität | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Wassergüteparameter • Festlegung der Zielfunktionen | <ul style="list-style-type: none"> • Messungen der Wasserversorger • Landesweite Grundwasserbeprobung (z.B. LfU in BW) |
| Betriebskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Kosten für Wassergewinnung und -aufbereitung • Festlegung der Zielfunktionen | <ul style="list-style-type: none"> • Betriebskostenrechnung der Wasserversorgungsunternehmen |
| Versorgungsgrad des Bodens | <ul style="list-style-type: none"> • Festlegung der Zielfunktionen für die Landwirtschaft | <ul style="list-style-type: none"> • „Wetterfax“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) |

12.3 Aussagegenauigkeit

Die Aussagegenauigkeit der Optimierung von Grundwasserentnahmen ist direkt mit der zur Verfügung stehenden Datenlage korreliert. Diese Daten gehen einerseits in die Erstellung des Bewertungssystems ein und andererseits sind diese Daten die Grundlage für eine abgesicherte Modellbetrachtung, die im Rahmen der Optimierung zur Anwendung kommt. Die für ein abgesichertes Bewertungssystem notwendige Datengrundlage ist im vorigen Kapitel beschrieben und exemplarisch für das Donauried im Leitfaden mit Bewirtschaftungsregeln (siehe Kap. 6) dargestellt. Die für eine abgesicherte Modellbetrachtung notwendige Datengrundlage ist abhängig von den hydrogeologischen Problemstellungen und dem zu erwartenden Betrieb des Optimierungs- und Managementsystems. Wird ein Managementsystem angestrebt, mit dem die optimalen Entnahmeverhältnisse für einen bestimmten Zeitraum im Voraus abgeschätzt werden sollen, so ist ein instationär geeichtes Modell unerlässlich. Weiterhin ist es dann notwendig, das numerische Modell hinsichtlich Modelleingangsdaten immer auf dem aktuellsten Stand zu halten. Die relevanten Modellein-

gangsdaten (vorwiegend Grundwasserneubildung und Grundwasserentnahmen) müssen ständig aktualisiert werden.

Die Aussagegenauigkeit bei der Optimierung ist abhängig von der Problemstellung, wobei hier insbesondere die *objective function* die Eindeutigkeit des Optimierungsergebnisses bestimmt. Wie die Anwendung im Donauried gezeigt hat, lassen sich eindeutige Optimierungsergebnisse vor allem dann erzeugen, wenn es ausgeprägte Minima in der *objective function* gibt. Das bedeutet, dass die Anwendung von Composite Programming zunächst eine verhältnismäßig gleichmäßige *objective function* verursacht, die die Identifizierung des absoluten Minimums in der *objective function* erschwert. Dies ist bei der Anwendung von Composite Programming zu berücksichtigen, ggf. muss das absolute Minimum durch mehrere Optimierungsbetrachtungen abgesichert werden bzw. dadurch die Bandbreite des Optimierungsergebnisses bestimmt werden. Dies kann notwendig werden, da der nichtlinearen Optimierung ein iteratives Verfahren zugrunde liegt und sogenannte lokale Minima als das absolute Minimum interpretiert werden können (Abb. 12.1).

Die Aussagesicherheit des Optimierungssystems lässt sich auch durch mehrmalige Anwendung des Bewertungssystems mit systematischer Variation der Entnahmeverteilungen absichern. Damit lassen sich Entnahmerichtlinien erarbeiten, die im Wasserwerksbetrieb umgesetzt werden können.

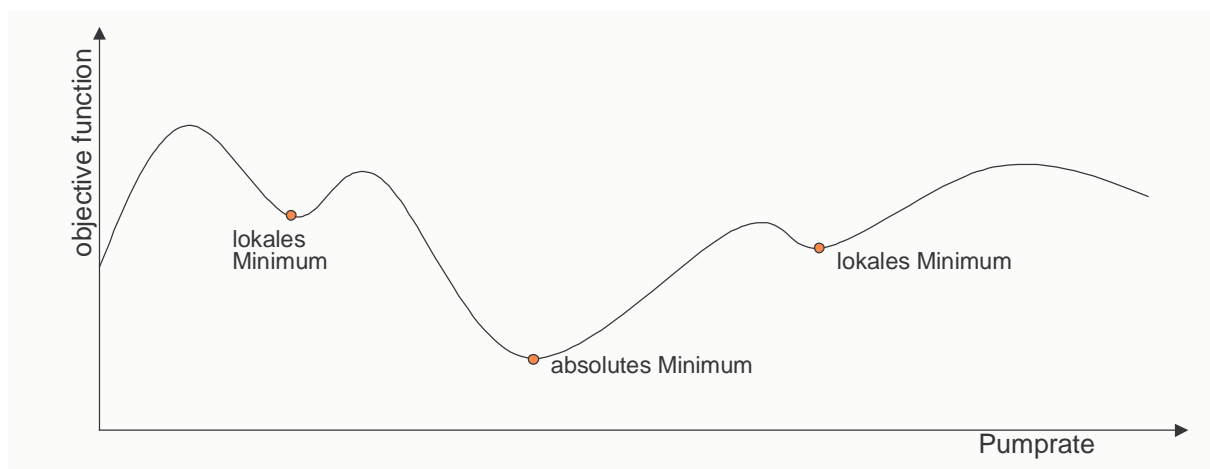


Abb. 12.1: Darstellung der *objective function* mit zwei lokalen und dem absoluten Minimum

12.4 Programmentwicklung Groundwater Resources Management

12.4.1 Aufgabenstellungen

In dem Programmsystem Groundwater Resources Management wurden die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Methoden in eine benutzerfreundliche Software umgesetzt. Es wurde ein erster Prototyp erstellt, mit dem eine Optimierung für stationäre und einfache instationäre Verhältnisse möglich ist. Die Eingabe der für die Optimierung erforderlichen Informationen wird grafisch unterstützt. Ebenso ist eine Auswertung und erste grafische

Darstellung der Ergebnisse mit GRM möglich. Mit Hilfe von GRM lassen sich derzeit folgende Aufgabenstellungen bearbeiten:

- Bewertung von Grundwasserentnahmen anhand eines flexiblen Bewertungssystems und Analyse von unterschiedlichen Entnahmeverhältnissen und
- Optimierung von Grundwasserentnahmen unter folgenden Vorgaben:
 - Minimierung der ökologischen Auswirkungen,
 - Optimierung des Wasserbedarfs für die Landwirtschaft sowie
 - Minimierung der Wasseraufbereitungskosten.

Das Ziel von GRM ist es, ein Werkzeug zunächst für einfache hydrogeologische Verhältnisse bereitzustellen und so die Optimierung von Grundwasserentnahmen auch für kleinere Wasserversorgungsunternehmen zu ermöglichen. Komplexe hydrogeologische Verhältnisse können in GRM berücksichtigt werden, sofern ein entsprechendes Grundwassermodell zur Verfügung steht, das mit GRM gekoppelt wird.

Die Anwendung von GRM ersetzt nicht die Aufbereitung der Daten und Informationen für ein objektives Bewertungssystem. Die Struktur des Bewertungssystems ist flexibel gehalten. Mit entsprechenden Schnittstellen ist es möglich, komplexe Zusammenhänge und Verknüpfungen der einzelnen Bewertungsgrößen insbesondere bei der Wasserversorgung mit einzubinden.

Neben der Optimierung der Strömungsverhältnisse wurde außerdem ein Modul entwickelt, mit dem einfache Konfigurationen beim sogenannten „pump and treat“ Verfahren im Rahmen der Altlastensanierung im gesättigten Grundwasserleiter betrachtet werden können. Dabei erfolgt die Ermittlung der optimalen Pumpraten bei Sanierungsfällen, um minimale Konzentrationen im abströmenden Grundwasser gewährleisten zu können. Dies wird anhand einer Transportsimulation von Wasserinhaltsstoffen ermöglicht. Da die Optimierung von Pumpraten bei Sanierungsfällen nicht Bestandteil des Forschungsvorhabens ist, wird die erforderliche Vorgehensweise hier nicht weiter vorgestellt.

Eine detaillierte Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten und über den Einsatz von GRM ist im Anhang in Kap. 15.3 enthalten. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass bei der Anwendung von GRM entsprechende Fachkenntnisse zum Thema Grundwassermodellierung und Optimierung erforderlich sind.

12.4.2 Struktur

Entsprechend der Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben besteht die Software GRM aus drei unterschiedlichen Komponenten. Diese sind:

- Bewertungssystem
- Grundwassermodell
- Optimierungssystem

Das Bewertungssystem ist hierarchisch aufgebaut. Mehrere Bewertungsebenen können eingeführt werden. Die Bewertung kann nach der klassischen Nutzwertanalyse oder Composite Programming erfolgen.

Für die Berechnung der Grundwasserströmungsverhältnisse kommt ein Grundwassermodell zum Einsatz, das für einfache Konfigurationen innerhalb von GRM erstellt werden kann. Sollte bereits ein Grundwassermodell für den Untersuchungsraum existieren, so besteht die Möglichkeit dieses in GRM einzubinden.

Als Optimierungsalgorithmus wird das Programm PEST in GRM eingesetzt. Zur Steuerung der Optimierung werden zunächst Standardparameter in GRM gesetzt, die vom Benutzer geändert werden können.

Die Bearbeitung einer Problemstellung wird in GRM mit grafischen Werkzeugen und Schnittstellen zum Import von bestehenden Daten unterstützt. Die Auswahl mehrerer Interpolationsverfahren ermöglicht die Anpassung des Systems auf reale Verhältnisse, in dem beispielsweise Verteilungen für die Aquiferbasis, die Geländeoberkante oder auch für Aquiferkennwerte ermittelt werden können. Beispielhaft ist der Prototyp von GRM in Abb. 12.1 mit Menüstruktur und Arbeitsfläche dargestellt. In der Kopfzeile der Desktopanwendung ist das Hauptmenü enthalten. Auf der linken Seite finden sich die Werkzeuge zur Visualisierung von Modelleingangsdaten, Bewertungsgrößen und Ergebnissen. Die Darstellung der Ergebnisse und Daten erfolgt auf der Arbeitsfläche des GRM. Hier können die Daten in Form von Karten georeferenziert, visualisiert und bearbeitet werden. Die Bearbeitung der Eingangsdaten kann entweder grafisch unterstützt auf der Arbeitsfläche oder innerhalb von Tabellen in GRM erfolgen. Da die Programmierung der grafischen Bearbeitung vergleichsweise aufwendig ist, wurden hier nur die grundlegenden Bearbeitungsmöglichkeiten realisiert. Eine weitergehende Bearbeitung ist in einem entsprechenden Geografischen Informationssystem notwendig.

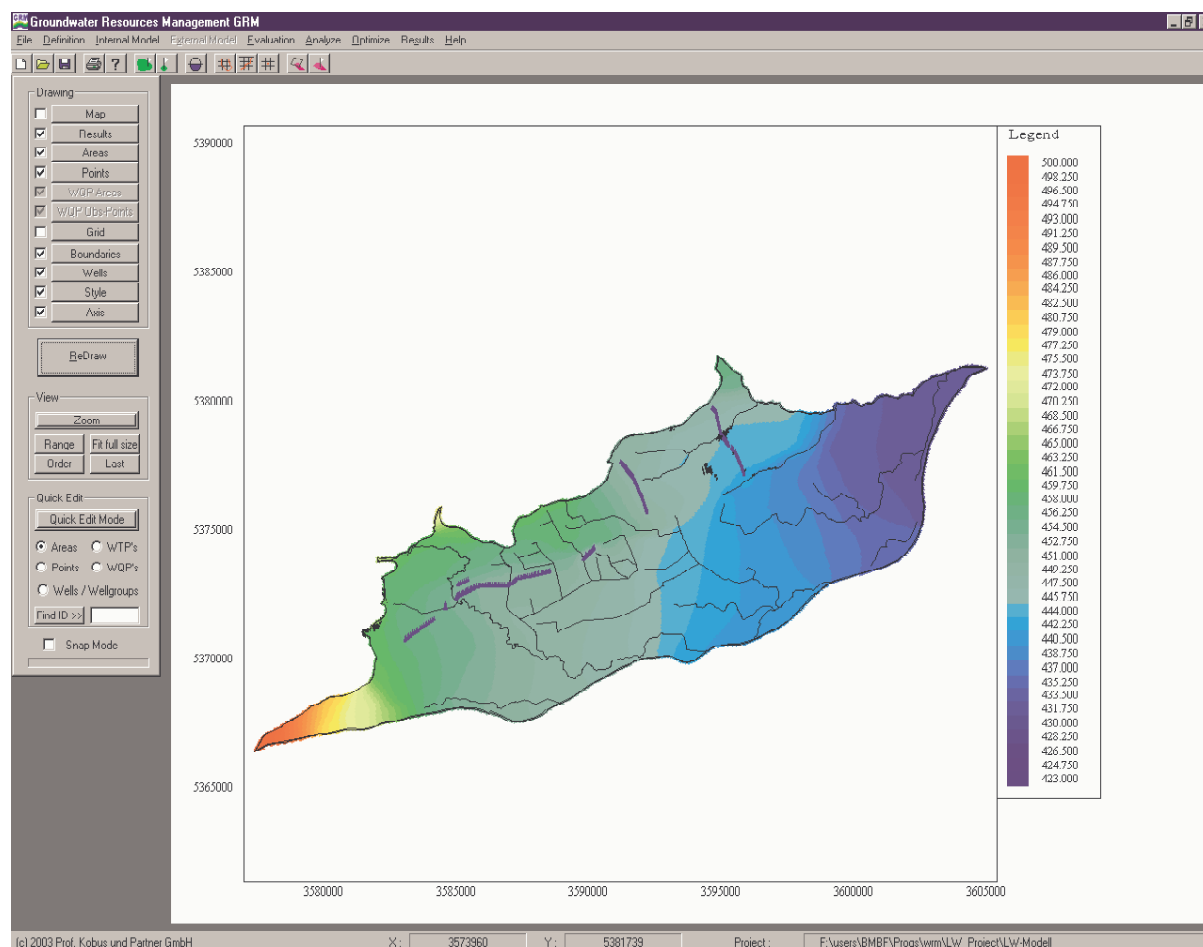


Abb. 12.1: Hauptmenü und Arbeitsfläche von GRM mit dem Beispiel des Kiesgrundwasserleiters im Donauried

12.4.3 Bewertungssystem

Das in GRM implementierte Bewertungssystem ist hierarchisch aufgebaut. Es lassen sich bis zu 10 Zielebenen einführen. Innerhalb der Zielebenen können mehrere Bewertungsgruppen definiert werden. Jede Bewertungsgruppe lässt sich mit einer Gewichtung belegen. Folgende Bewertungsgrößen stehen in GRM zur Verfügung:

- Flurabstände für Punkte
- Flurabstände für Flächen
- Wasserqualitäts- und Aufbereitungsparameter

Die Flurabstände werden anhand der Ergebnisse aus dem Grundwassermodell berechnet. Sie sind abhängig von den Entnahmeverhältnissen. Es lässt sich zwischen Punkten und Flächen unterscheiden. Im Anwendungsbeispiel für das Donauried wurden zwar Punkte verwendet, diese basieren aber auf der Auswertung der Flächennutzung. Es wurde jedem Berechnungsknoten des Grundwassermodells im Untersuchungsraum jeweils eine Bewertungsfläche zugeordnet. Dies hat den Vorteil, dass jede Bewertungsfläche in so viele Bewertungspunkte unterteilt werden kann, wie Berechnungspunkte innerhalb der Bewertungsflächen liegen. Werden Bewertungsflächen verwendet, so werden von GRM mittlere

Flurabstände bestimmt. Dies ist bei vergleichsweise großen Bewertungsflächen von Nachteil, da die Bewertung des Flurabstandes nur mit der mittleren Größe erfolgt.

Die Wasserqualitäts- und Aufbereitungsparameter werden den einzelnen zu optimierenden Brunnen oder Fassungen zugeordnet. Durch eine Mischungsrechnung wird der Nutzwert einer Gruppe des Wasserqualitäts- oder Aufbereitungsparameter bestimmt. Es kann damit eine Entnahme hinsichtlich einzelner Wasserqualitätsparameter wie z.B. Nitrat, Härte oder Pflanzenschutzmittel durch Bestimmung der Mischkonzentration bewertet werden. Mit dieser Methode lassen sich auch Wasseraufbereitungsparameter wie z.B. Pumpkosten berücksichtigen. D.h., dass den zu optimierenden Brunnen jeweils spezifische Kosten für die Förderung pro l/s zugeordnet wird. Es wird davon ausgegangen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Fördermenge und den Kosten vorliegt. Ist dies nicht der Fall, so muss die jeweilige Bewertungsgröße anhand einer Schnittstelle zu GRM berechnet werden. Dies ist ebenfalls möglich und wurde am Beispiel des Donaurieds für die Berechnung der durchschnittlichen Wasserhärte unter Berücksichtigung der vorhandenen Entcarbonisierungsanlage realisiert.

Da die Bewertungsgrößen unterschiedliche Einheiten aufweisen (z.B. Flurabstand in m und Nitratkonzentration in mg/l) müssen diese Größen innerhalb des Bewertungssystems normiert werden. Dies geschieht anhand der Zielfunktionen, die gleichzeitig eine Bewertung der jeweiligen Größe vornehmen. Mit den Zielfunktionen wird einer Bewertungsgröße ein Nutzwert zwischen 0 und 1 bzw. 0% und 100% zugeordnet. 1 bzw. 100% definieren dabei das Optimum einer Zielgröße, das durch Variation der Grundwasserentnahmen erreicht werden soll bzw. den optimalen Nutzwert.

In GRM wird das Bewertungssystem auch dazu verwendet, die Problemstellung im Vorfeld einer Optimierung zu analysieren. Dabei werden die Teilnutzwerte und der Gesamtnutzwert für die Grenzen der Entnahmen (minimale und maximale Entnahme) bestimmt. Diese Analyse gibt Auskunft, wie groß der Nutzwert einer Bewertungsgröße innerhalb der Optimierung werden kann. Erreicht eine Bewertungsgröße bei der minimalen und maximalen Entnahme keinen Teilnutzwert größer als 0, so wird diese Bewertungsgröße in der Optimierung nicht mitberücksichtigt. Sind die zu erreichenden Teilnutzwerte einer Bewertungsgröße vergleichsweise klein, so muss der Benutzer von GRM entscheiden, ob diese Bewertungsgröße bei einer Optimierung mitverwendet werden soll.

Für das Bewertungssystem lässt sich auch angeben, ob die klassische Nutzwertanalyse oder Composite Programming verwendet wird. Im Hinblick auf die Optimierung ist zu beachten, dass Composite Programming in Abhängigkeit der gewählten Parameter dazu führt, dass das Minimum in der objective function abgeschwächt wird. Das bedeutet, dass das Auffinden des absoluten Optimums bei Composite Programming deutlich schwieriger ist als bei der Nutzwertanalyse, der eine lineare Wichtung der Teilnutzen zugrunde liegt.

12.4.4 Grundwassermodell

Da im Rahmen des Grundwassermanagements und der Optimierung von Grundwasserentnahmen die Grundwasserströmungsverhältnisse für unterschiedliche Entnahmesituationen prognostiziert werden müssen, ist die Anwendung eines Grundwasserströmungsmodells unabdingbar. In GRM sind zwei unterschiedliche Möglichkeiten implementiert:

- Internes Modell
- Externes Modell

Es besteht die Möglichkeit, innerhalb von GRM ein zweidimensionales, horizontal ebenes Grundwassermodell aufzubauen. Da der Modellaufbau nicht die vordringliche Zielsetzung von GRM ist, ist nur ein beschränkter Modellaufbau möglich. Das Grundwassermodell kann aber zumindest für einfache hydrogeologische Konfigurationen eingesetzt werden. Die Aquiferparameter (z.B. Durchlässigkeit, Aquiferbasis und Oberkante) können horizontal differenziert angesetzt werden. Als Randbedingungen können Festpotenzial, Zufluss oder Leakage-Randbedingung genutzt werden. Der Modellaufbau wird grafisch unterstützt. Ein Import von Daten zur Generierung der Modelleingangsdaten ist möglich. Das Programm GRM ist eine WINDOWS-Applikation und damit auf jedem PC mit WINDOWS-Betriebssystem lauffähig.

Ist für ein Projektgebiet bereits ein prognosefähiges Grundwassermodell vorhanden, kann dieses als externes Modell in GRM eingebunden werden. Dazu müssen Schnittstellen definiert werden, die den Informationsfluss zwischen dem externen Modell und GRM gewährleisten. Als externe Modelle können sowohl Finite-Differenzen als auch Finite-Elemente-Programme verwendet werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung von externen Modellen eine robuste und fehlerfreie Simulation gewährleistet werden muss. Dies ist insbesondere im Hinblick auf extreme Grundwasserentnahmen wichtig, die im Rahmen der Optimierung automatisch vom System geprüft werden. Fehlerhafte Strömungsberechnungen führen zu falschen Optimierungsergebnissen, die nicht vom System überprüft werden können.

Das System GRM überträgt die Modellergebnisse anhand eines vom Benutzer zu definierenden Auswertungsrasters. Dieses Auswertungsraster muss das Untersuchungsgebiet, innerhalb dessen Bewertungsgrößen vorliegen, umfassen. Die vom externen Modell berechneten Piezometerhöhen werden dann auf das Auswertungsraster interpoliert. Als externes Modell kann auch ein instationäres Modell verwendet werden. In diesem Fall ist die Piezometerhöhenverteilung zu einem Zeitpunkt an GRM zu übergeben. Innerhalb von GRM wird die Piezometerhöhenverteilung zu einem Zeitpunkt wie das Ergebnis einer stationären Berechnung betrachtet. Da für die Optimierung nur Flurabstände verwendet werden, muss mit dem Grundwassermodell die Grundwasseroberfläche bestimmt werden.

12.4.5 Optimierungssystem

Das in GRM verwendete Optimierungssystem ist PEST. Die Optimierung wird über die im PEST-Manual beschriebenen Parameter gesteuert (DOHERTY, 2000). In GRM sind diese Parameter voreingestellt und können auch vom Benutzer geändert werden, falls die Optimie-

rung nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt. Dazu ist anzufügen, dass von GRM und PEST des Optimierungsergebnisses nur mathematisch überprüft werden können. Die Güte der Optimierung ist auch abhängig von der Problemstellung und den Optimierungsparametern. Hier sei auf das Kap. 2.7 verwiesen, da bei der mehrdimensionalen Optimierung mehrere lokale Minima der objective function (bzw. optimale Lösungen) möglich sind. Abhängig von den Optimierungsparametern kann das absolute Minimum der objective function (bzw. das absolute Optimum) gefunden werden. Um dies zu überprüfen, muss das Protokoll der Optimierung, das von GRM erstellt wird, analysiert werden. Die wesentlichen Optimierungsparameter, die auf das Erreichen eines Optimums hindeuten und damit zu einer Beendigung der Optimierung führen, sind folgende:

- NOPTMAX: Maximale Anzahl von Optimierungsiterationen. Diese Parameter verhindert eine uneffektive Optimierung mit vielen Iterationen.
- PHIREDSTP: Relative Änderung der objective function, die auf Konvergenz hindeutet.
- NPHINHORED: Maximale Anzahl von aufeinander folgenden Modellläufen, die zu keiner Verbesserung der objective function führen.
- RELPARSTP: Relative Änderung der Pumpraten, die auf Konvergenz hindeuten. Je kleiner die von PEST vorgeschlagenen Änderungen der Pumpraten sind, um so näher befindet sich die Optimierung an dem optimalen Ergebnis
- NRELPAR: Maximale Anzahl von Modellläufen mit geänderten Pumpraten, die kleiner sind als RELPARSTP. Wird diese Anzahl erreicht, wird die Optimierung beendet.

Neben den Steuerungsparametern, die das Ende der Optimierung bestimmen, lässt sich auch die iterative Vorgehensweise bei der Optimierung steuern. Dabei ist im wesentlichen darauf zu achten, dass die maximale Änderung der Pumpraten nicht so groß ist, dass die Optimierung konvergiert. Weiterhin entscheidet die Startverteilung der Pumpraten und die Grenzen der Entnahmen über den Verlauf der Optimierung. Es empfiehlt sich für die anfänglichen Pumpraten diejenigen zu wählen, die aus einer vorangegangenen Optimierung oder aus dem Betrieb bereits bekannt sind. Um aber ein Ergebnis bezüglich des relativen oder absoluten Optimums zu überprüfen, besteht die Möglichkeit, in einer zweiten Optimierung mit deutlich anderen Startverteilungen für die Entnahme zu beginnen. Dadurch wird die objective function durch den Optimierungsalgorithmus in anderen Wertebereichen der Pumpraten bezüglich eines absoluten Optimums durchsucht.

12.4.6 Visualisierung

Die Bearbeitung eines Optimierungsproblems wird in GRM durch die zweidimensionale Visualisierung von Modelleingangsdaten und Ergebnisdaten unterstützt. Zunächst lassen sich als Punkte folgende Größen darstellen:

- Brunnenstandorte
- Bewertungspunkte und Flächen klassifiziert nach Bewertungsgruppe

Weiterhin lassen sich als Isoflächen folgende Größen darstellen:

- Piezometerhöhen der Analyse und des Optimierungsergebnisses
- Flurabstände der Analyse und des Optimierungsergebnisses

- Bewertungspunkte nach der Analyse oder der Optimierung klassifiziert nach dem Nutzwert
- Bewertungsflächen nach der Analyse oder der Optimierung klassifiziert nach dem Nutzwert

Wird ein internes Modell verwendet, so lassen sich folgende Modelleingangsdaten grafisch darstellen:

- Modellnetz
- Randbedingungen:
 - Festpotenzial
 - Zu- bzw. Abfluss
 - Leakagerandbedingung als Gewässer oder Drainage

Die Randbedingungen lassen sich grafisch unterstützt definieren. Weiterhin lassen sich Texte und einfache Geometrien der Ergebnisdarstellung hinzufügen. Außerdem kann eine digitale Kartengrundlage in die Ergebnisdarstellung eingebunden werden.

12.4.7 Beispiel

Die Funktionsweise wird nachfolgend anhand eines Beispiels dargestellt. In dem Beispiel wird ein internes Modell verwendet. Die Randbedingungen für das interne Strömungsmodell entsprechen dem in Kap. 7.5.2 dargestellten Prinzipbeispiel. Als Bewertungsgrößen werden die Flurabstände in den in Abb. 12.1 dargestellten beiden Flächen sowie der Wasserqualitätsparameter Nitrat verwendet. Innerhalb des Testbeispiels soll die optimale Entnahmereverteilung für die beiden Entnahmefrünnen 1 und 2 unter den beiden Bewertungsflächen bestimmt werden. Das Rohwasser des Brunnens 1 weist eine Nitratkonzentration von 20 mg/l, das des Brunnens 2 von 35 mg/l auf. Nach der gewählten Zielfunktion ist der optimale Nitratgehalt des Mischwassers aus beiden Brünnen kleiner als 25 mg/l. Nitratgehalte größer als 50 mg/l weisen einen Zielerfüllungsgrad von 0 auf. Auf der landwirtschaftlichen Fläche liegen die optimalen Flurabstände zwischen 1,5 und 2,3 m. In der Naturschutzfläche wird ein optimaler Flurabstand von 0,2 bis 0,8 m angenommen. An den beiden Brünnen sollen in der Summe 65 l/s entnommen werden.

Die generelle Grundwasserströmung ist von oben nach unten gerichtet. An dem linken und rechten Modellrand wird eine Randstromlinie angenommen.

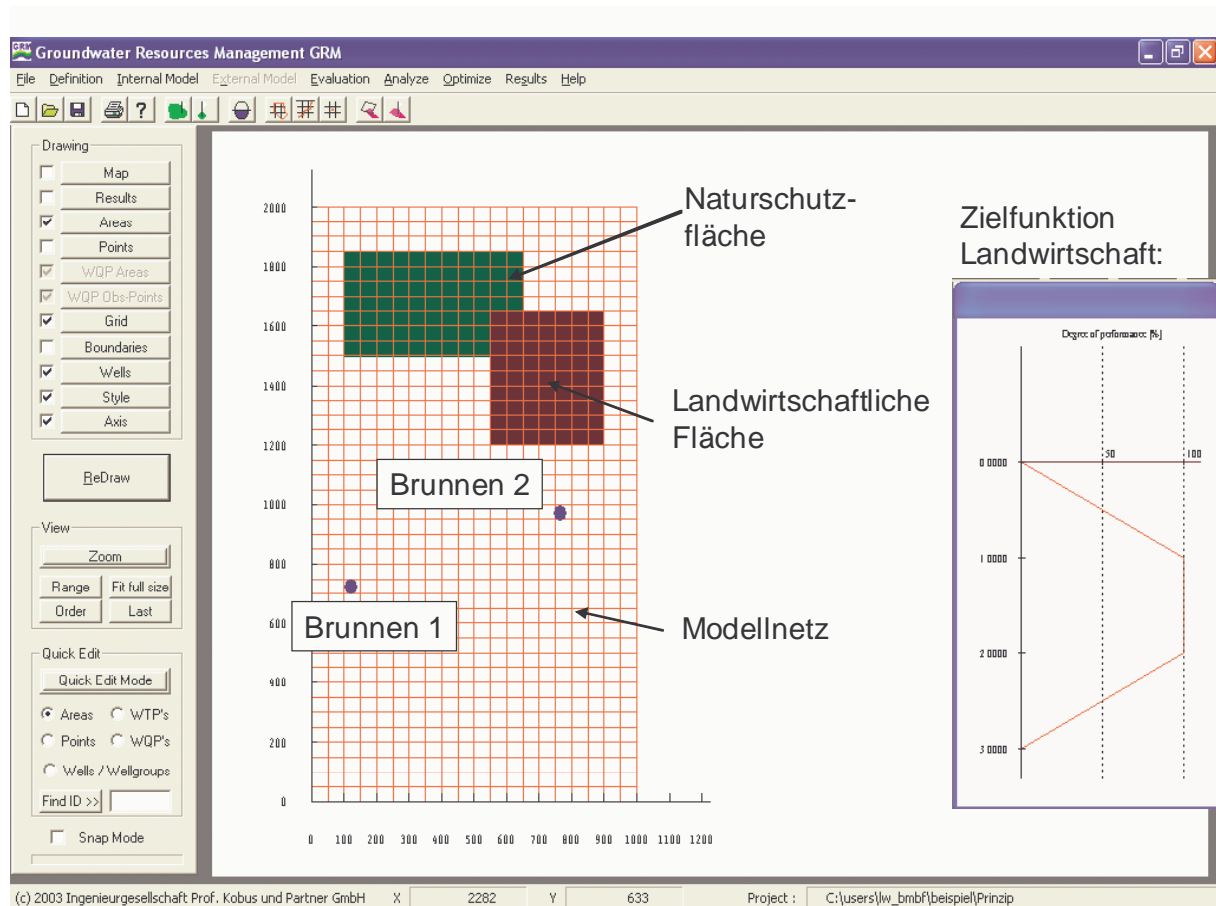


Abb. 12.1: Modellnetz, Bewertungsflächen und Zielfunktion in GRM

Wird eine Optimierung durchgeführt, so ergeben sich optimale Entnahmeraten der beiden Brunnen von:

- Brunnen 1: 41 l/s
- Brunnen 2: 24 l/s

Die sich aus dieser optimalen Entnahmeverteilung ergebenden Piezometerhöhen sind in Abb. 12.2 dargestellt. Danach führt die größere Entnahme an Brunnen 1 zu tieferen Piezometerhöhen in diesem Bereich.

Mit Hilfe von GRM lässt sich auch die Wasserbilanz für das Beispiel auswerten. Diese ist auch in Abb. 12.2 dargestellt. Danach liegt die Entnahme durch die beiden Brunnen in der Größenordnung der Neubildung. Der Zufluss vom oberen Modellrand entspricht in etwa dem Abfluss über den unteren Festpotentialrand.

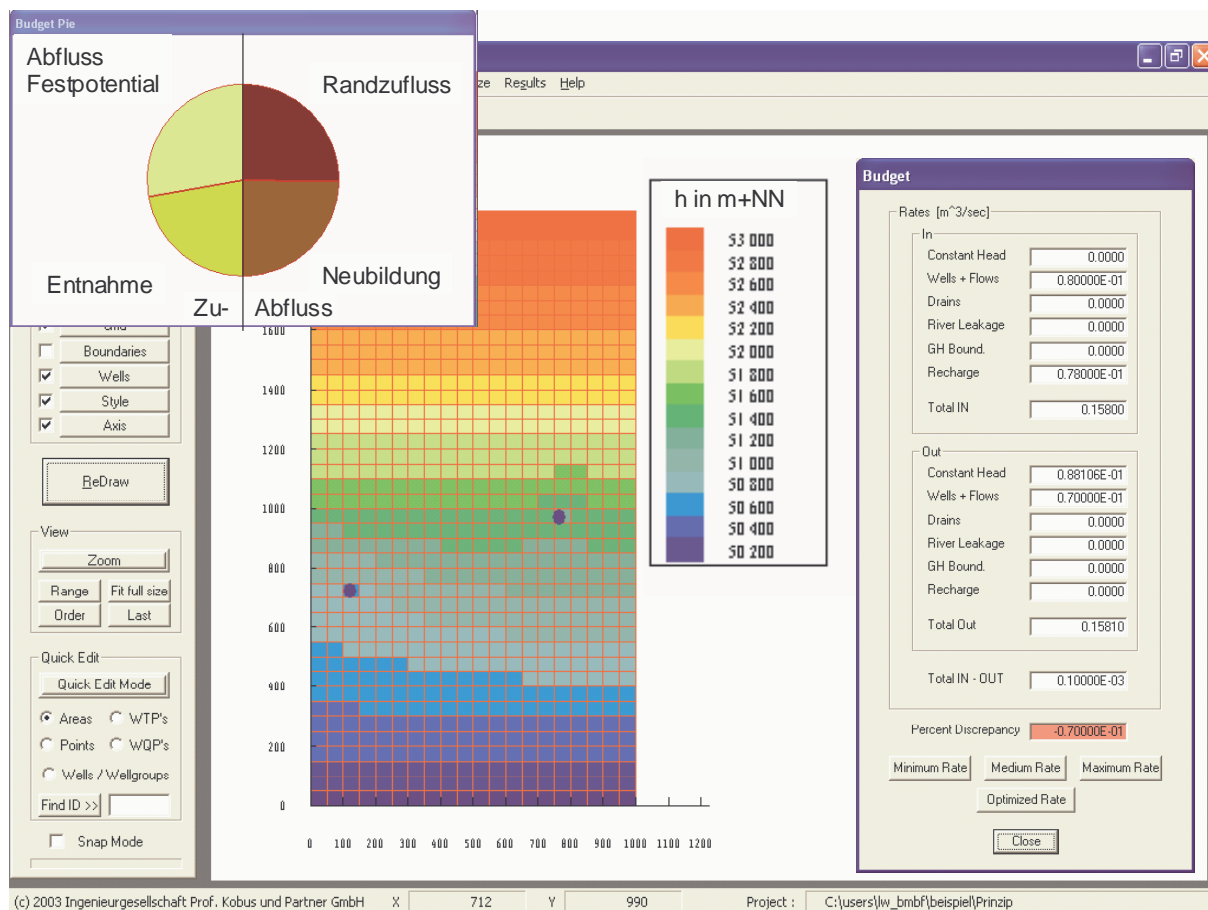


Abb. 12.2: Berechnete Piezometerhöhenverteilung und Wasserbilanz für die optimale Entnahme in GRM

Die sich aus der Optimierung ergebenden Teilnutzwerte sind in Abb. 12.3 dargestellt. Danach liegt der Gesamtnutzwert bei 79 %. Die Wasserversorgung erreicht einen Nutzwert von 97%, die Landwirtschaft von 67 % und der Naturschutz von 73 %. Dass von dem Optimierungsalgorithmus am Brunnen 1 eine höhere Entnahme vorgeschlagen wird, lässt sich wie folgt begründen:

- Die Naturschutzfläche ist vom Brunnen 1 weiter entfernt als vom Brunnen 2. Damit ist die Absenkung durch Brunnen 1 im Bereich der Naturschutzfläche geringer als durch Brunnen 2 bei gleicher Entnahme. Bei einer höheren Entnahme in Brunnen 1 als in Brunnen 2 sind die Auswirkungen durch beide Brunnen ähnlich.
- Die Nitratkonzentration im Brunnen 1 ist deutlich kleiner als vom Brunnen 2. Deshalb wirkt sich eine verstärkte Entnahme aus Brunnen 1 positiv für die Wasserversorgung aus.

Mit einer höheren Entnahme an Brunnen 2 könnte zwar der Grundwasserstand im Bereich der landwirtschaftlichen Fläche abgesenkt werden. Eine höhere Entnahmerate am Brunnen 2 hat aber deutliche Nachteile für Naturschutz und Wasserversorgung.

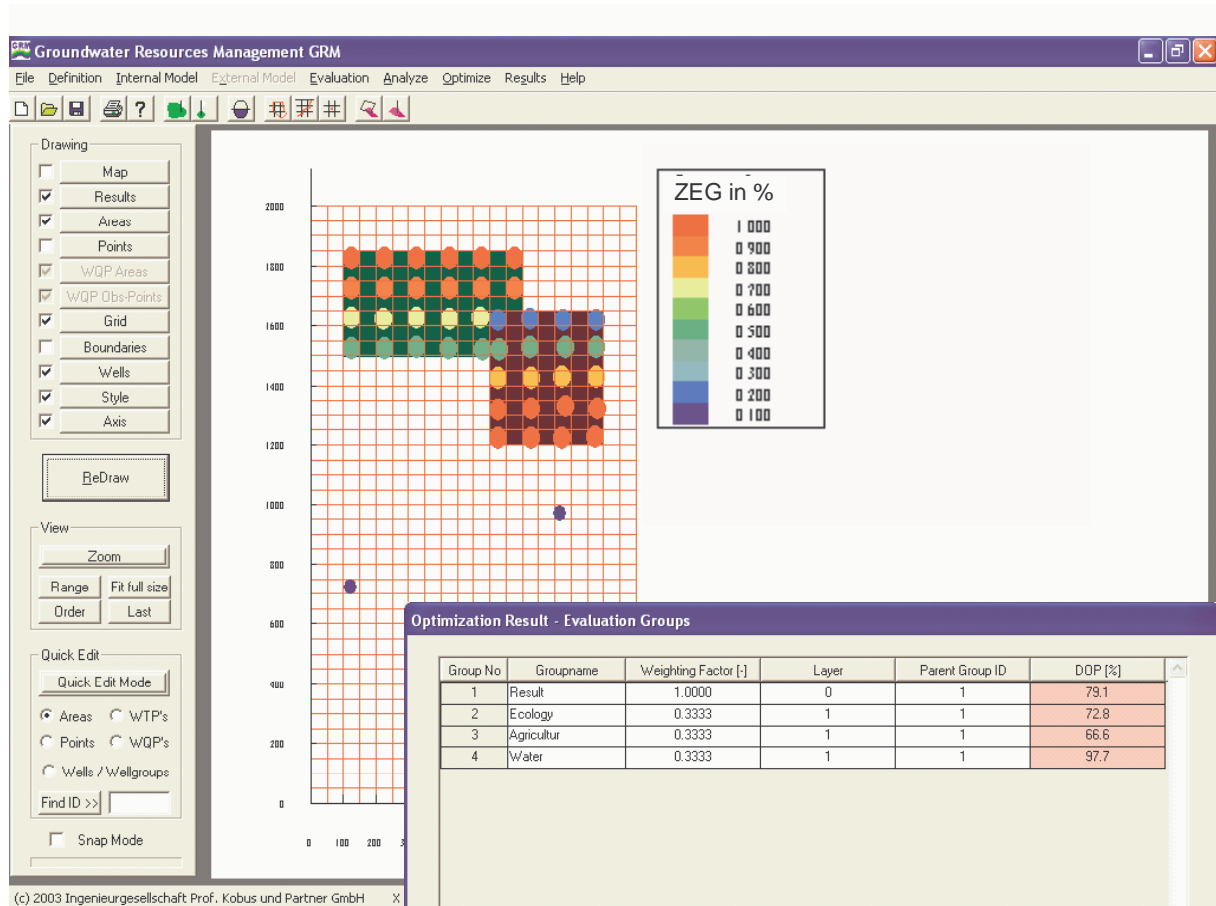


Abb. 12.3: Ergebnis der Optimierung für das Testbeispiel mit dem Zielerfüllungsgrad der einzelnen Bewertungsflächen und Teilnutzwerte der Bewertungsgrößen