

7 ENTWICKLUNG EINES OPTIMIERUNGSSYSTEMS FÜR STATIONÄRE VERHÄLTNISSE

7.1 Übersicht

Die Optimierung des Gebietswasserhaushalts kann nur durch die Variation der Entnahmen gesteuert werden. Im folgenden werden die Grundlagen erarbeitet, um die Auswirkungen unterschiedlicher Entnahmen auf die Flurabstände zu bewerten und somit die Zielerfüllungsgrade in den Schwerpunktbereichen Wasserwirtschaft, Naturschutz und Landwirtschaft zu optimieren. Die Kopplung mit dem automatischen Optimierungsprogramm PEST wird aufgebaut und ausführlich getestet. Der Test erfolgt zunächst an einem einfachen Prinzipbeispiel. Dabei werden auch Sensitivitätsuntersuchungen zur Wahl der Gewichtungen und der Zielfunktionen durchgeführt. Unter Einbindung des in Kap. 5 entwickelten komplexen Bewertungssystem für das Donauried erfolgt dann eine Anwendung des Optimierungssystems. Dabei werden dann die Fassungsentnahmen im Donauried für stationäre Strömungsverhältnisse optimiert.

Die programmtechnische Umsetzung des Optimierungssystem erfolgte allgemeingültig in dem Programm Groundwater Resources Management (GRM), das ausführlich im Anhang in Kap. 15.3 dargestellt ist.

7.2 Aufgaben und Ziele eines Optimierungssystems

Erste Aufgabe des Optimierungssystems ist es nun ganz allgemein, auf die Bewertungsgrößen Einfluss zu nehmen. Dabei ist es zunächst nicht entscheidend, in welche Richtung die Bewertungsgrößen verändert werden, ob in Richtung der Zielgrößen oder von ihnen weg. Die Identifikation der Richtung der Veränderung der Eingangswerte stellt ein schwieriges Problem dar. Das Optimierungssystem benötigt eine „Vorstellung“ über Form und Gestalt der sog. „objective function“ (vgl. Kap. 2.7). Die am Anfang einer Optimierung zunächst unbekannte Funktion stellt den Zusammenhang zwischen den Optimierungsgrößen und der Bewertung dar. Eine Variation des Bewertungssystem verändert die Form der objective function, eine Veränderung der Optimierungsparameter beeinflusst die Gestalt nicht. Um nun die bestmögliche Vorstellung von der objective function zu bekommen, verändert das Optimierungssystem zunächst die Optimierungsgrößen so, dass nacheinander jede Optimierungsgröße größer oder kleiner gewählt wird als der Startwert. Bei z.B. sechs Optimierungsgrößen (sechs Fassungen) werden zunächst sechs Situationen simuliert um eine stichpunktartige Vorstellung über die Form der objective function zu bekommen. Für jede Optimierungsgröße existiert damit ein Indikator, ob durch eine Vergrößerung (oder Verkleinerung) derselben eine Verbesserung (oder Verschlechterung) des Gesamtnutzwerts erzielt wird. Die gleichzeitige Veränderung der Optimierungsgrößen erfolgt im nächsten Schritt. Mit steigender Anzahl der

bewerteten Situationen und zunehmender Optimierung des Ergebnisses steigt auch der Informationsgehalt über die Form der objective function. Eine stetige Verbesserung des Ergebnisses ist das Ziel in dieser Phase der Optimierung, wobei allerdings die Variationen so breit gestreut werden müssen, dass auch das absolute Minimum oder Maximum gefunden wird und die Optimierung nicht bei einem lokalen Minimum endet. Der Abschluss der Optimierung kann anhand verschiedener Kriterien festgelegt werden: maximale Anzahl von bewerteten Situationen, bestimmte Anzahl von erfolglosen Verbesserungsversuchen, nur noch minimale Verbesserungen oder Kombinationen dieser Kriterien. Weitere, sekundäre Aufgaben sind dabei die Optimierung in einer möglichst kurzen Zeit und mit einer höchstmöglichen Vertrauenswürdigkeit. Damit definiert sich das Gesamtziel des Optimierungssystems bzw. der iterative Weg bis zum Gesamtziel: Finden der optimalen Entnahmeraten an den einzelnen Fassungen z.B. des Donaurieds in möglichst kurzer Zeit, so dass sich durch die Bewertung das bestmögliche Ergebnis ergibt.

7.3 Anforderungen an ein Optimierungssystem und Integration des Bewertungssystems

7.3.1 Analyse der Bewertungsgrößen und mögliche Zielerfüllungsgrade

Die Analyse der Bewertungsgrößen hat immer vor einer möglichen Optimierung zu erfolgen. Sie hat das Ziel, die Möglichkeiten einer Optimierung auszutesten. Im Falle der stationären Optimierung erfolgt dies nur einmal, da sich die hydrologischen Randbedingungen nicht ändern. Anschließend können die Optimierungen für verschiedene Nebenbedingungen (siehe Kap. 7.3.2), wie Gesamtentnahme, Kompensationsfaktoren usw. mit eben diesen Bewertungsgrößen erfolgen. Wie diese Bewertungsgrößen festgelegt werden, ist ausführlich in Kap. 5 dargelegt. Der theoretisch maximal mögliche Zielerfüllungsgrad für jede einzelne Bewertungsgröße beträgt 100 %, somit ist auch der maximale Gesamtnutzwert immer 100%, egal welche Zahl an Bewertungsgrößen, welcher Kompensationsfaktor usw. definiert wird.

Am Beispiel eines Prinzipmodells werden vor der Optimierung drei Modellläufe zur Festlegung der theoretisch möglichen Zielerfüllungsgrade durchgeführt. Diese sind:

- minimale Entnahme,
- mittlere Entnahme,
- maximale Entnahme.

Mit der Analyse der möglichen Zielerfüllungsgrade soll auch ein Eindruck gewonnen werden, welche Piezometerhöhen sich einstellen werden, und ob eine Optimierung innerhalb der zugelassenen Entnahmegrenzen möglich und sinnvoll ist. Die Anwendung erfolgt in Kap. 7.6.

7.3.2 Nebenbedingungen

Dem Optimierungssystem müssen Nebenbedingungen vorgegeben werden, um die Grenzen zu definieren, innerhalb derer das System die Optimierungsgrößen variieren kann. Im Falle der Optimierung des Gebietswasserhaushalts sind die Grenzen der Optimierungsgrößen die

minimalen und maximalen Entnahmen an den Fassungen. Außerdem wird die Gesamtentnahmemenge an allen Fassungen vorgegeben.

Die maximal möglichen Entnahmemengen an den einzelnen Fassungen sind dabei entweder von realen Begrenzungen (z.B. der Pumpenleistung) abhängig oder aber von den maximalen Mengen, die der Aquifer leisten kann. Im Donauried wurde deshalb die maximale Entnahmerate der einzelnen Fassungen vom Grundwassermodell bestimmt. Bei den minimalen Mengen sind die Grenzen nur von betrieblichen Vorgaben abhängig (Mindestfließgeschwindigkeit in den Rohren, Minstdrehzahl der Pumpen). **Eine Abschaltung der Fassungen ist aus betrieblicher Sicht unerwünscht.** Somit sind die oberen und unteren Entnahmegrenzen definiert, innerhalb derer das Optimierungssystem die optimale Lösung finden muss. Eine weitere Nebenbedingung ist nun noch die gewünschte Gesamtentnahmemenge an allen Fassungen. Bei der stationären Optimierung ist dieser Bedarf zeitlich konstant (vgl. Kap. 6.2). Diese Nebenbedingungen müssen eingehalten werden.

7.4 Optimierungssystem

7.4.1 Module des Optimierungssystems

Das Optimierungssystem besteht aus mehreren Modulen. Das „Modul“ PEST übernimmt die zentrale Rolle der eigentlichen Optimierung. Die anderen Module sind nötig, um PEST mit den „Modulen“ Grundwassermodell und Bewertungssystem zu koppeln und den Datenaustausch zu gewährleisten. Der Prozessablauf des Optimierungssystems ist in Abb. 7.1 dargestellt.

An PEST werden die Gewichte der einzelnen Bewertungsgrößen sowie die obere und untere Grenze der einzelnen Fassungsentnahmen und der Startwert für die Optimierung der Entnahmen als Eingabegrößen übergeben. Ausgabegrößen von PEST sind die einzelnen Fassungsentnahmen. Es muss also ein System von ineinandergreifenden Prozessen konstruiert werden, das die Eingabe- und Ausgabegrößen verarbeitet. Im folgenden wird die Aufgabe und Funktionsweise der einzelnen Module dargelegt.

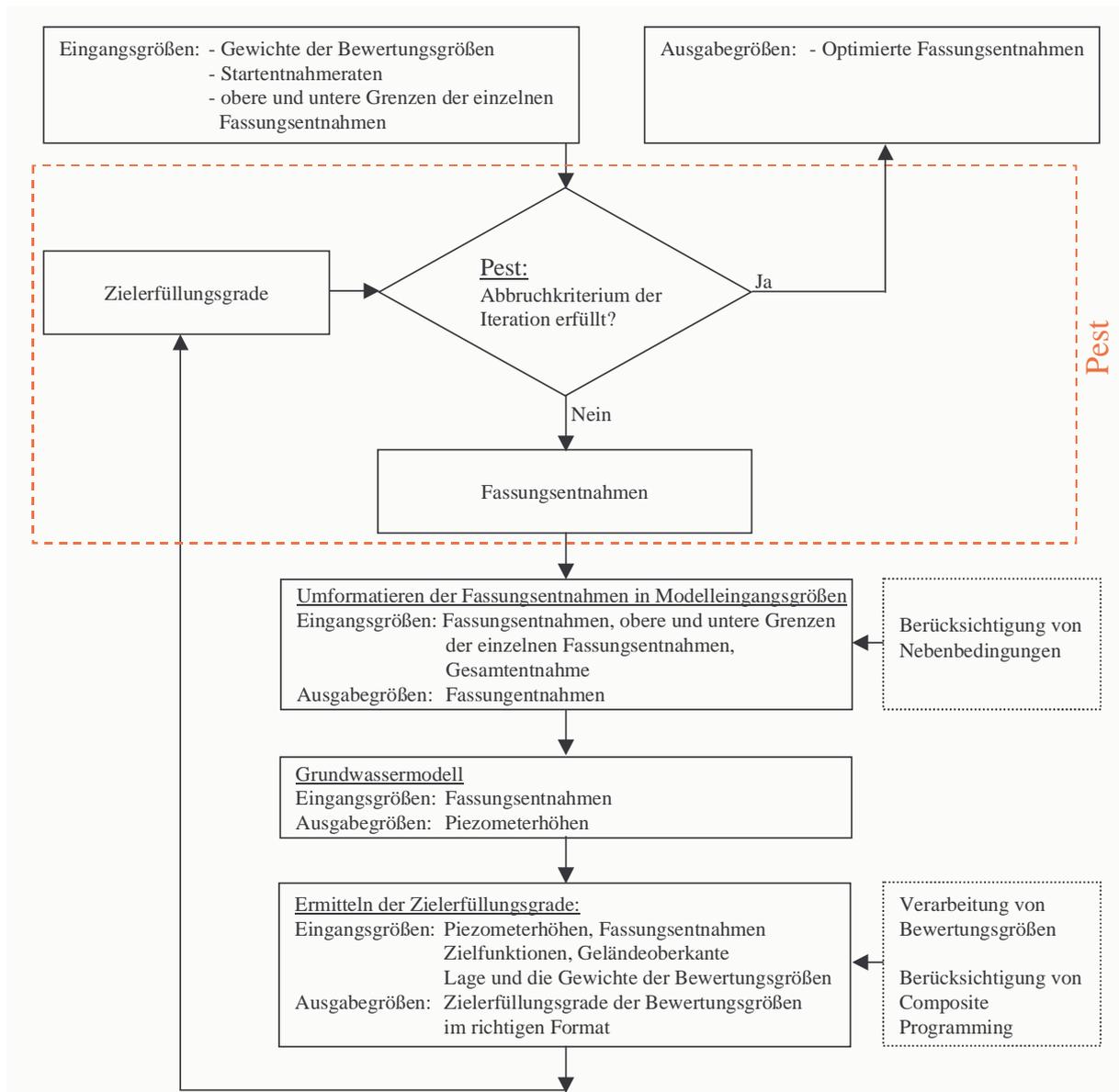


Abb. 7.1: Flussdiagramm des Optimierungssystems

7.4.2 Methodenentwicklung zur Berücksichtigung von Nebenbedingungen

Das erste Modul nach PEST ist ein Modul zur Berücksichtigung der Nebenbedingungen. Dabei gibt es zwei Arten von Nebenbedingungen: die Gesamtentnahme und die obere bzw. untere Grenze der einzelnen Grundwasserentnahmen. Die Grenzen der einzelnen Grundwasserentnahmen können der Optimierung direkt vorgegeben werden. Für eine vorgegebene Gesamtentnahme musste allerdings eine spezielle Methode entwickelt werden, da PEST ansonsten nicht zu 100% die Wassermenge entnimmt, sondern eine geringe Entnahme lediglich schlechter bewertet. Eine Beeinflussung des Ergebnisses durch die Nebenbedingungen ist aber unerwünscht. Die Lösung des Problems ist ein zusätzliches Modul, das die Optimierungsgrößen bevor sie an das Grundwassermodell übergeben werden, prüft und ggf. verändert. Schlägt PEST Entnahmewerte vor, die in der Summe nicht der gewünschten Gesamtentnahme entsprechen, werden sie nach folgendem Schema angepasst.

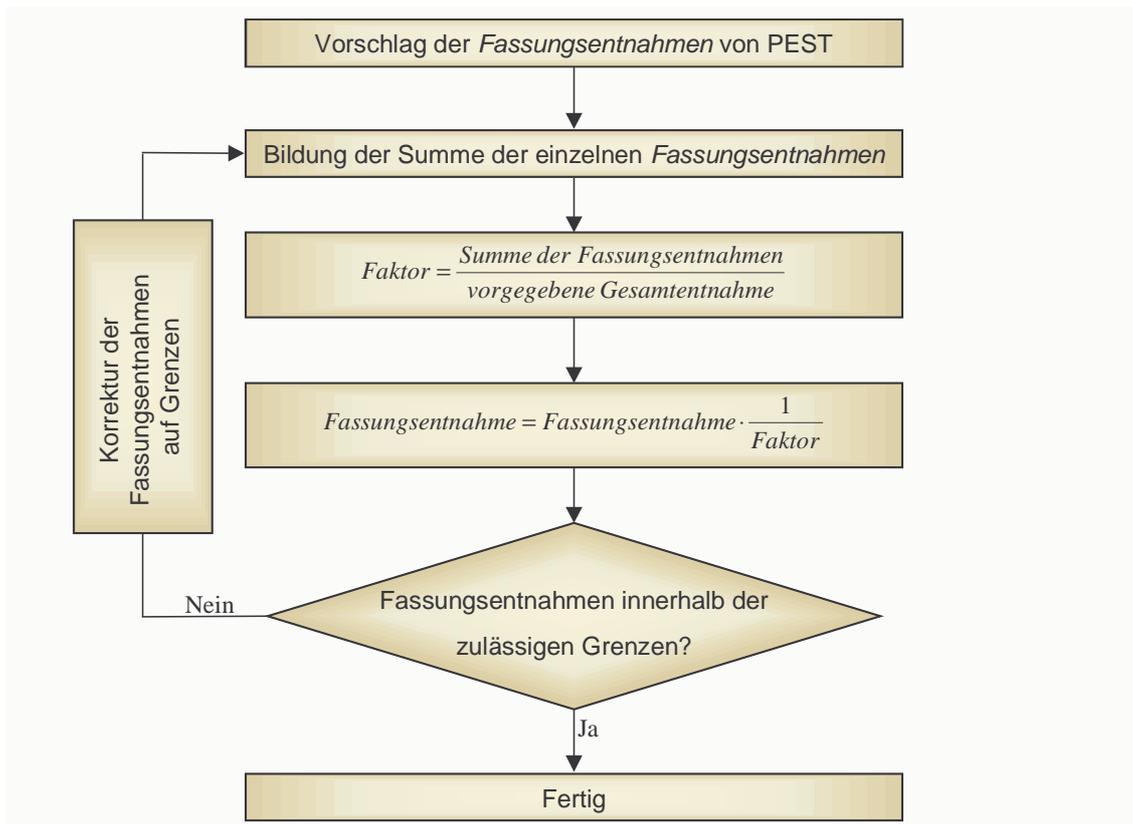


Abb. 7.1: Flussdiagramm der Berücksichtigung der Nebenbedingungen

Falls die Summe der Fassungsentnahmen der Gesamtentnahme entspricht, ist der Faktor in Abb. 7.1 gleich 1 und die Schleife wird beendet. Wenn allerdings eine Gesamtentnahme vorgegeben wird, die unter Einhaltung der zulässigen Grenzen der einzelnen Fassungsentnahmen nicht erreichbar ist, wird die Iteration abgebrochen und eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben.

7.4.3 Methodenentwicklung zur Verarbeitung von Bewertungsgrößen

Die Verarbeitung der Bewertungsgrößen ist eine zentrale Aufgabe des Optimierungssystems. Als Eingabegrößen fließen in diesen Prozess die Geländeoberkante, die Lage und die Gewichtungen der einzelnen Teilflächen, die Zielfunktionen, die Grundwasserstände und die Entnahmen ein. Dabei kann dieses Modul in sechs Einzelschritte unterteilt werden. Im ersten Schritt werden die vom Grundwassermodell berechneten Piezometerhöhen von der Geländeoberkante abgezogen. Zusammen mit der Ortslage ergibt sich für jeden Bewertungspunkt der Flurabstand. Dieser Flurabstand wird im zweiten Schritt mit der Zielfunktion des Bewertungspunktes verglichen und somit der Zielerfüllungsgrad ermittelt. Bei den Wasserqualitätsparametern erfolgt zunächst die Berechnung der Mischungskonzentrationen. Beim hier betrachteten Anwendungsfall werden die Konzentrationen von Nitrat und Härte nach dem in Kap. 5.3.2 dargelegten Schema bestimmt. Die Mischungskonzentrationen werden mit den zugehörigen Zielfunktionen verglichen und somit der Zielerfüllungsgrad dieser Bewertungsgrößen bestimmt.

Die einzelnen Zielerfüllungsgrade sind nun verfügbar. Um nun Teilnutzwerte bzw. den Gesamtnutzwert berechnen zu können, müssen noch die Gewichte jeder einzelnen Bewertungsgröße bekannt sein. Diese werden auf Grundlage des Zielsystems berechnet. Beispielfähig sei das Vorgehen hier nun am Zielsystem des Anwendungsfalls (Tab. 7.1) erläutert.

Tab. 7.1: Zielsystem des Anwendungsfalls ohne Kompensationsfaktoren

Zielebenen mit Gewichtungsfaktoren				
1	2	g	3	g
Optimierung des Gebietswasserhaushalts im Wassergewinnungsgebiet Donauried	Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft	0,33	Minimierung der Nitratkonzentration im Mischwasser	0,3
			Minimierung der Gesamthärte im Mischwasser	0,3
			Vermeidung von Ausw. aus nitratreichen Deckschichten	0,2
			Minimierung der entstehenden Betriebskosten	0,2
	Schwerpunktbereich Landwirtschaft	0,33	Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 1	0,5
			Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 2	0,3
			Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 3	0,15
			Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 4	0,05
	Schwerpunktbereich Naturschutz	0,33	Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 1	0,6
			Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 2	0,4

Da im verwendeten Optimierungsalgorithmus PEST keine hierarchische Struktur vorgegeben werden kann, sondern alle Bewertungsgrößen auf einer Stufe stehen, muss diese anhand des Zielsystems für PEST aufgearbeitet werden. Dazu werden zunächst die Gewichtungen aller Gruppen multipliziert, die dieser Bewertungsgröße übergeordnet sind, d.h. sich in einer höheren Zielebene befinden. Anschließend wird diese Zahl durch die Anzahl der Bewertungsgrößen geteilt, die sich in der gleichen Gruppe befinden wie die betrachtete Bewertungsgröße. Beispielsweise beinhaltet die Gruppe „Optimierung der Flurabstände innerhalb der Wertstufe 4“ im Schwerpunktbereich der Landwirtschaft, kurz „Landwirtschaft 4“ genannt, im stationären Mittelwasserfall 71 Bewertungsgrößen. Die Gewichtung ergibt sich aus der Multiplikation der Gewichtungen der übergeordneten Gruppen, nämlich (Gewichtung „Schwerpunktbereich Landwirtschaft“) · (Gewichtung „Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 4“) = $0,33 \cdot 0,05 = 0,0165$. Dieser Wert wird durch die Anzahl der Bewertungsgrößen in der Gruppe geteilt, somit ergibt sich für jede Bewertungsgröße in dieser Gruppe ein Gewicht von $0,0165 / 71 = 2,32 \cdot 10^{-4}$. Für die Wasserqualitätsparameter erfolgt die Berechnung analog. Für die Bewertungsgröße „Minimierung der Nitratkonzentration im Mischwasser“ ergibt sich eine Gewichtung von 0,099 (= $0,33 \cdot 0,3$). Die Summe über alle Gewichtungen der Bewertungsgrößen des Zielsystems ergibt 1,0.

7.4.4 Methodenentwicklung zur Berücksichtigung von Composite Programming

Das Verfahren und die Ziele von Composite Programming wurden in Kap. 2.5 eingehend erläutert. PEST kann nur einzelne Bewertungsgrößen verarbeiten. Composite Programming jedoch ist eine Methode der Aggregation von Bewertungsgrößen zu Nutzwerten. Diese Nutzwerte werden zunehmend abgemindert, je größer die Unausgeglichenheit zwischen den Nutzwerten in der darunter liegenden Zielebene ist. Die Abminderung der Nutzwerte auf die

Zielerfüllungsgrade der Bewertungsgrößen muss in PEST auch für die Berechnung der objective function erfolgen. Dies geschieht in den folgenden zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der Gesamtnutzwert nach Composite Programming berechnet (siehe Gl. 3.3), dann der Gesamtnutzwert nach der Nutzwertanalyse (siehe Gl. 3.1). Zwischen diesen beiden Gesamtnutzwerten besteht in der Regel ein Unterschied, d.h. der Gesamtnutzwert nach Composite Programming ist geringer. Dieser Unterschied wird auf den Gesamtnutzwert nach der Nutzwertanalyse normiert.

$$Faktor = \frac{Gesamtnutzwert_{Nutzwertanalyse} - Gesamtnutzwert_{Composite Programming}}{Gesamtnutzwert_{Nutzwertanalyse}} \quad Gl. 7.1$$

Anschließend werden die Zielerfüllungsgrade aller Bewertungsgrößen um genau diesen Faktor abgemindert.

$$ZEG_i = ZEG_i \cdot (1 - Faktor) \quad Gl. 7.2$$

Da ein Kompensationsfaktor größer 1 nur auf Zielebene 2 angewandt wird (siehe Abb. 5.1), d.h. für alle Bewertungsgrößen gleichermaßen gilt, ist es zulässig, nur einen Faktor auf alle Zielerfüllungsgrade anzuwenden. Würden Kompensationsfaktoren größer 1 auch in tieferen Zielebenen Anwendung finden, müssten die Zielerfüllungsgrade entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu verschiedenen Teilnutzwerten, die evtl. mit verschiedenen Kompensationsfaktoren berechnet würden, abgemindert werden.

7.4.5 Methodenentwicklung zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden von PEST und der Nutzwertanalyse

Wie bereits in Kap. 2.7.2 dargelegt, ist PEST eine Software für allgemeine Optimierungs- oder Eichzwecke. Sie wurde nicht entwickelt, um Systeme zu optimieren, die nach der Methode der Nutzwertanalyse arbeiten. PEST nutzt die Gauss-Marquardt-Levenberg Methode, was bedeutet, dass die Optimierung durch die Minimierung einer Gütefunktion realisiert wird. PEST arbeitet, angepasst auf den vorliegenden Fall, nach folgender Formel:

$$objective\ function = \sum_i [Gewichte_i^* \cdot (1 - ZEG_i^*)]^2 \rightarrow 0 \quad Gl. 7.1$$

mit:

- Gewichte_i^{*} = Gewichtung der Bewertungsgröße i, die PEST verwendet
- ZEG_i^{*} = Zielerfüllungsgrad der Bewertungsgröße i, die PEST verwendet
- 1 = theoretisch maximal möglicher Zielerfüllungsgrad der Bewertungsgröße i (hier immer 1)
- i = Index der Bewertungsgröße i

In PEST werden die maximal möglichen Zielerfüllungsgrade angegeben, d.h. im vorliegenden Bewertungssystem immer 100%. PEST bildet dann das Residuum (die Differenz) zwischen Bewertungsgröße und diesen 100%. Das Residuum wird mit der Gewichtung multipli-

ziert und anschließend quadriert. PEST versucht, die Summe aller Residuen zu minimieren. Die Nutzwertanalyse hingegen versucht, möglichst große Gesamtnutzwerte zu erreichen. Sie arbeitet nach folgender Formel:

$$\text{Gesamtnutzwert} = \sum_i [\text{Gewichte}_i \cdot \text{ZEG}_i] \rightarrow 1 \quad \text{Gl. 7.2}$$

mit:

Gewichte_i = Gewichtung der Bewertungsgröße i
 ZEG_i = Zielerfüllungsgrad der Bewertungsgröße i
 i = Index der Bewertungsgröße i

Diese beiden Methoden gilt es nun zu vereinen. Die unterschiedlichen Zielsetzungen (PEST: Minimierung; Nutzwertanalyse: Maximierung) spielen keine Rolle, da bei PEST das Residuum gebildet wird. Der Unterschied besteht in der Quadrierung der Klammer in Gl. 7.3. Nach Umformen, Gleichsetzen und einigen weiteren Rechenoperation entstehen folgenden Zusammenhänge:

$$\text{Gewichte}_i^* = \sqrt{\text{Gewichte}_i} \quad \text{Gl. 7.3}$$

$$\text{ZEG}_i^* = -\sqrt{(1 - \text{ZEG}_i)} + 1 \quad \text{Gl. 7.4}$$

Werden die Gewichte und Zielerfüllungsgrade vor der Übergabe an PEST nach diesen Formeln umgewandelt, ergibt die Summe zwischen Gesamtnutzwert und objective function immer 100%. Wird durch PEST die objective function im Zuge der Optimierung um einen Betrag gesenkt, steigt der Gesamtnutzwert um genau diesen Betrag an. Wird das optimale Ergebnis in PEST erreicht (objective function = 0,0) ergibt sich der Gesamtnutzwert zu 1,0 und umgekehrt. Somit wurde erreicht, dass der schwer greifbare reine Zahlenwert der objective function einen aussagekräftigen Zahlenwert darstellt, nämlich die Differenz zwischen Gesamtnutzwert und dem maximal möglichen Gesamtnutzwert von 100%.

7.5 Sensitivitätsuntersuchung

7.5.1 Übersicht

Anhand der Untersuchungen an einem einfachen Prinzipmodell soll die Funktionsweise des Optimierungssystems verdeutlicht werden. Es werden die prinzipiellen Möglichkeiten, die sich bei der Optimierung bieten, angesprochen. Des weiteren soll durch verschiedene Variantenrechnungen des Ausgangsfalles die Sensitivität des Optimierungsprozesses auf veränderte Eingangsparameter gezeigt werden. Das Prinzipmodell wird ebenfalls mit der Software Modflow2000 berechnet. Es wird eine einfache Geometrie gewählt, bei der die hydraulischen Verhältnisse nachvollziehbar sind und ausschließlich mit dem im Kap. 15.3 dargelegten, neu entwickelten Programmsystem GRM neu aufgebaut. Hiermit soll auch die Leistungsfähigkeit dieses Systems angedeutet werden.

7.5.2 Aufbau Prinzipmodell

Es wird eine Ausdehnung des Modellgebiets von $1000 \cdot 2000 \text{ m}^2$ gewählt (Ursprung des Berechnungsgitters ist ein virtueller Nullpunkt, wobei das Gitter nicht gedreht ist). Die Diskretisierung wird mit 20 Spalten und 40 Reihen äquidistant festgelegt, woraus folgt, dass eine Modellzelle die Dimensionen $50 \cdot 50 \text{ m}^2$ hat.

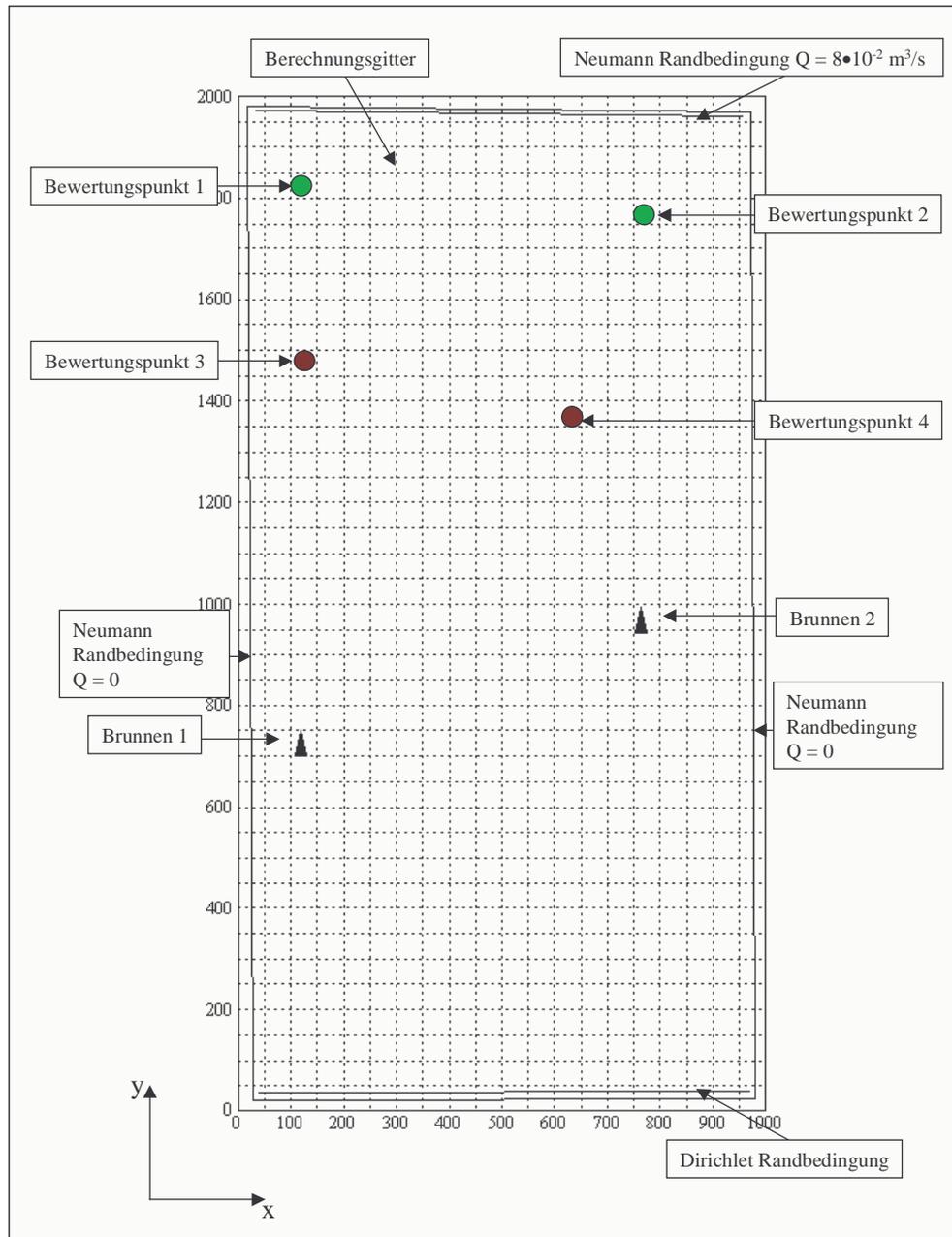


Abb. 7.1: Aufbau des Prinzipmodells

Die Geländeoberkante liegt konstant bei 53,5 m. Es werden in der Sensitivitätsuntersuchung die Entnahmen zweier unabhängiger Brunnen optimiert. Die genauen Positionen der Brunnen sind in Abb. 7.1 erkennbar. Es werden ungespannte Grundwasserverhältnisse angenommen, die maximal mögliche Aquifermächtigkeit erstreckt sich somit von der Aquiferbasis, die konstant bei 20,0 m festgelegt ist, bis zur Geländeoberkante. Die hydraulische Durchlässigkeit wird mit $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ angesetzt. Die Ausgangspiezometerhöhe liegt konstant bei 53,0

m. Die Grundwasserneubildung wird zu $4 \cdot 10^{-8}$ m/s für das gesamte Modellgebiet gewählt. Als erste Randbedingung wird an der oberen Seite über die gesamte Breite des Modellgebiets eine Neumann-Randbedingung gewählt, die dem Aquifer einen Zustrom von $8 \cdot 10^{-2}$ m³/s liefert. Als weitere Randbedingung wird an der unteren Seite eine Dirichlet-Randbedingung definiert, die eine konstante Piezometerhöhe von 50,0 m vorgibt. In Abb. 7.1 ist das Prinzipmodell in der Aufsicht wiedergegeben.

Es stellt sich aufgrund der gewählten Randbedingungen eine Grundwasserströmung vom oberen Modellrand zum unteren ein, wobei der Grundwasserstand von 53,7 m auf 50,0 m sinkt. Die Strömung ist im gesamten Modellgebiet parallel zu den Randstromlinien. Der Flurabstand steigt somit in Richtung $y \rightarrow 0$ kontinuierlich an, da die Geländehöhe konstant bei 53,5 m liegt.

7.5.3 Bewertungssystem

Es sollen im Prinzipmodell drei unabhängige Schwerpunktbereiche betrachtet werden, die jeweils dem Naturschutz, der Landwirtschaft und der Wasserwirtschaft zugeordnet sind. Im Gegensatz zum Anwendungsfall Donauried werden keine weiteren Untergruppen definiert, so dass alle Bewertungsgrößen direkt in einen der drei Schwerpunktbereiche eingeteilt werden. Das hierarchische Bewertungssystem stellt sich mit der vorläufigen Gewichtung wie folgt dar (Tab. 7.1):

Tab. 7.1: Zielebenen und Gewichtungsfaktoren des Prinzipbeispiels

Zielebenen mit Gewichtungsfaktoren		
1	2	Gewichtung
Optimierung des Gesamtnutzwertes	Schwerpunktbereich Naturschutz	0,33
	Schwerpunktbereich Landwirtschaft	0,33
	Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft	0,33

Die Ermittlung des Nutzwertes erfolgt aus Gründen der einfacheren Nachvollziehbarkeit nach der klassischen Nutzwertanalyse. Als Bewertungsgrößen werden im Prinzipmodell vier Beobachtungspunkte, die sich im oberen Teil des Modellgebiets befinden, sowie ein Wasserqualitätsparameter eingesetzt. An den Beobachtungspunkten wird der sich jeweils ergebende Flurabstand ausgewertet. Die räumliche Lage der Punkte kann man ebenfalls aus Abb. 7.1 entnehmen. Die Bewertungspunkte 1 und 2 (grün) sind dem Schwerpunktbereich Naturschutz zugeordnet, die Bewertungspunkte 3 und 4 (braun) dem Schwerpunktbereich Landwirtschaft. Die Zielfunktionen werden wie folgt gewählt:

Tab. 7.2: Zielfunktionen für die Flurabstände des Prinzipbeispiels.

Nr. Zielfunktion	GFA _{min} [m]	GFA _{opt1} [m]	GFA _{opt2} [m]	GFA _{max} [m]
1	0,0	0,2	0,8	1,5
2	1,0	1,5	2,3	3,0

Tab. 7.3: Eckpunkte der Zielfunktion für den Wasserqualitätsparameter des Prinzipbeispiels (ZEG entspricht Zielerfüllungsgrad)

Nr. Zielfunktion	ZEG=1,0	ZEG=1,0	ZEG=0,0
3	0,0	30,0	50,0

Die Zielfunktion 1 wird den dem Naturschutz zugeordneten Bewertungspunkten 1 und 2 zugewiesen. Hier ist Flurabstand von 0,2 m bis 0,8 m optimal. Für die der Landwirtschaft zugeordneten Punkte gilt Zielfunktion 2 mit optimalen Flurabständen zwischen 1,5 m und 2,3 m.

Dem Wasserqualitätsparameter Nitrat wird die Zielfunktion 3 zugewiesen (Tab. 7.3). Man erkennt, dass ein Nitratgehalt des Mischwassers von 0 mg/l bis 30 mg/l optimal ist, bei höheren Nitratgehalten fällt der Zielerfüllungsgrad linear ab und bei Konzentrationen über 50 mg/l (gesetzlicher Grenzwert laut TrinkwV, 2001) ist der Zielerfüllungsgrad gleich Null.

Als Wasserqualitätsparameter wird die Nitratkonzentration des sich ergebenden Mischwassers aus den zwei Brunnen betrachtet. Dazu wird für jeden Brunnen die Nitratkonzentration des geförderten Wassers vorgegeben. Brunnen 1 fördert Wasser mit einer Nitratkonzentration von 20 mg/l, Brunnen 2 mit 45 mg/l. Der Wasserqualitätsparameter wird der Zielfunktion 3 zugeordnet und in den Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft eingeteilt.

Optimierungsgrößen sind die Entnahmeraten der beiden Brunnen. Die Pumpraten beider Brunnen sind bei der Optimierung von 10 l/s als minimale Entnahme bis zu 60 l/s als maximale Entnahme variierbar. Als Startentnahme wird 30 l/s pro Brunnen vorgegeben. Die Brunnen sind keiner Fassung zugeteilt und deshalb unabhängig von einander, sofern keine Gesamtentnahme vorgegeben wird.

7.5.4 Analyseergebnisse

Zunächst wird das System analysiert, d.h. es werden drei Szenarien modelliert:

- minimale Entnahme an beiden Brunnen (jeweils 10 l/s),
- maximale Entnahme an beiden Brunnen (jeweils 60 l/s) und
- Entnahme gemäß den Startbedingungen (jeweils 30 l/s).

Bei den minimalen Entnahmen ergibt sich ein Flurabstand zwischen 0,07 m am oberen Rand und 3,50 m am unteren, dazwischen sinkt der Grundwasserspiegel kontinuierlich ab. Bei den mittleren Pumpraten steigt der Flurabstand ausgehend von 0,56 m auf 3,50 m am unteren Festpotentialrand. An den Brunnen bilden sich zwei Absenkungstrichter aus. Bei den maximalen Pumpraten errechnet das Modell einen Flurabstand von 1,31 m am oberen Rand und 3,50 m am unteren. An Brunnen 1 ergibt sich eine Absenkung von 3,70 m, es fließt aber kein Wasser vom unteren Festpotentialrand zurück ins Modellgebiet.

Aus Tab. 7.1 kann man die Flurabstände der Beobachtungspunkte bei den drei vorgegebenen Entnahmeraten ablesen, sowie die sich daraus ergebenden Zielerfüllungsgrade.

Tab. 7.1: Flurabstände und Zielerfüllungsgrade bei vorgegebenen Entnahmen (ZEG = Zielerfüllungsgrad)

Punkt Nr.	Minimale Entnahmeraten		Mittlere Entnahmeraten		Maximale Entnahmeraten	
	Flurabstand [m]	ZEG [%]	Flurabstand [m]	ZEG [%]	Flurabstand [m]	ZEG [%]
1	0,257	100,0	0,75	100,0	1,52	0,0
2	0,326	100,0	0,83	95,9	1,60	0,0
3	0,754	0,0	1,26	51,0	2,02	100,0
4	0,997	0,0	1,51	100,0	2,30	100,0

Man erkennt, dass die Bewertungspunkte 1 und 2, die der Naturschutzgruppe und Zielfunktion 2 zugeordnet sind, bei minimalen Entnahmeraten zu 100 % erfüllt sind. Dagegen ist der Flurabstand für die Bewertungspunkte 3 und 4, die der Landwirtschaftsgruppe und Zielfunktion 3 zugeordnet sind, bei minimalen Pumpraten zu gering, der Zielerfüllungsgrad liegt bei 0%.

Umgekehrt verhält es sich bei maximalen Entnahmeraten. Die Flurabstände sind für die Bewertungspunkte 1 und 2 zu hoch, sie erreichen einen Zielerfüllungsgrad von 0%. Die Zielerfüllungsgrade der Punkte 3 und 4 erreichen 100%. Dazwischen, d.h. bei mittleren Entnahmeraten, sind die Punkte 1 und 4 optimal erfüllt, nicht aber die Punkte 2 und 3, damit erreicht keine Gruppe optimale Ergebnisse bei dieser Rate.

Die Unterschiede in den Zielerfüllungsgraden zeigen, dass es durch die richtige Wahl der Entnahmeraten hydraulisch möglich sein muss, die Flurabstände so zu beeinflussen, dass jeweils ein Zielerfüllungsgrad 100% erreicht wird. Es ist aber nicht sichergestellt, dass die Flurabstände aller vier Punkte gleichzeitig optimiert werden können.

Die Mischwasserkonzentration des Wasserqualitätsparameters Nitrat ist für alle drei Pumpraten der Analyse konstant bei 32,5 mg/l, dies ist auf das konstante Verhältnis der Entnahmeraten zueinander zurückzuführen und entspricht einem Zielerfüllungsgrad von 87,5 %.

7.5.5 Optimierungsergebnis

Für die in Kap. 7.5.3 dargelegten Zielfunktionen und Gewichtungen wird nun optimiert. Es erfolgten vier Optimierungen, eine Optimierung mit frei wählbarer Gesamtentnahme und drei Optimierungen mit vorgegebener Gesamtentnahme von 0,05 m³/s, 0,07 m³/s und 0,09 m³/s. Es ergeben sich die in Tab. 7.1 dargestellten Nutzwerte.

Tab. 7.1: Optimierungsergebnis der Sensitivitätsuntersuchung

	Gesamtentnahme [m ³ /s]			
	Frei=0,075	0,05	0,07	0,09
Teilnutzwert Wasserwirtschaft [%]	100,0	88,7	100,0	100,0
Teilnutzwert Naturschutz [%]	85,5	100,0	87,1	55,6
Teilnutzwert Landwirtschaft [%]	89,0	51,3	86,2	100,0
Gesamtnutzwert ¹⁾ [%]	91,5	80,0	91,1	85,2

¹⁾ Da das Bewertungssystem ohne Kompensationsfaktor angelegt wurde, kann der Gesamtnutzwert einfach durch Addition der Teilnutzwerte und anschließende Division durch drei errechnet werden.

Der maximale Gesamtnutzwert wird bei der Optimierung mit freier Gesamtentnahme erreicht. Er liegt mit 91,5 % sehr nahe am theoretischen Maximum von 100%. Der Teilnutzwert Wasserwirtschaft erreicht außer bei der vorgegebenen Gesamtentnahme von 0,05 m³/s immer 100%. Die Verteilung der Gesamtentnahme auf die beiden Brunnen gelingt offensichtlich bei höherer Entnahmemenge immer optimal für die Wasserwirtschaft. Für den Schwerpunktbereich Naturschutz äußert sich wie erwartet eine möglichst geringe Entnahme durch hohe Teilnutzwerte. Je höher die Gesamtentnahme ist, desto geringer ist der Teilnutzwert. Für den Schwerpunktbereich Landwirtschaft hingegen ist die Tendenz der Teilnutzwerte umgekehrt, je höher die Gesamtentnahme ist, desto höher ist der Teilnutzwert. Aufgrund dieser Tendenzen der Teilnutzwerte erreicht der Gesamtnutzwert das Maximum ca. in der Mitte der untersuchten Entnahmemengen als Kompromiss zwischen den Schwerpunktbereichen Naturschutz und Landwirtschaft.

7.5.6 Sensitivitätsstudie zur Gewichtung

In diesem Kapitel wird nun das Prinzipmodell mit unterschiedlichen Gewichtungen für die Schwerpunktbereiche optimiert. Die Bewertungsstruktur wird dabei immer beibehalten, lediglich die Gewichtungsfaktoren der Gruppen werden verändert. Der Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft wird konstant bei einem Gewicht von 33,33% gehalten, und da die Summe der Gewichtungsfaktoren aller Gruppen immer 100% ergeben muss, werden die restlichen 66,67% zwischen den beiden anderen Gruppen aufgeteilt. Es werden 7 Fälle betrachtet für die Variation der Gewichtung, und zwar für das Verhältnis (Gewicht Naturschutz / Gewicht Landwirtschaft) die Fälle (66,67/0), (50,0/16,67), (40,0/26,67), (33,33/33,33), (26,67/40,0), (16,67/50,0), (0/66,67).

Zunächst werden die Zielfunktionen, wie in Kap. 7.5.3 definiert, beibehalten. Die Optimierung erfolgt dabei mit einer vorgegebenen Gesamtentnahme oder frei, d.h. die Gesamtentnahme kann vom Optimierungssystem frei gewählt werden. Die Anfangspumpraten betragen bei freier Gesamtentnahme zunächst 30 l/s für jeden Brunnen, bei vorgegebener Gesamtentnahme jeweils 50% dieses Wertes. In den folgenden Diagrammen wird immer der Zielerfüllungsgrad der Gruppe angegeben, dieser ergibt sich aus dem Mittel der zugeordneten Punkte. Um das Kapitel übersichtlich zu halten werden nur wesentliche Ergebnisse in aufbereiteter Form präsentiert. Die Ergebnisse der Optimierung aus Kap. 7.5.5 sind in den Punkten 1 und 2 beinhaltet.

7.5.6.1 Variation der Gewichtung bei freier Gesamtentnahme

Die Variation der Gewichtung bei freier Gesamtentnahme ist der Ausgangsfall, auf den alle Variationen der Eingangsparameter aufbauen. Die Gewichtung ist auf der Abszisse dargestellt. Auf der Ordinate sind die erreichten Teilnutzwerte (links) und die Gesamtentnahme (rechts) dargestellt.

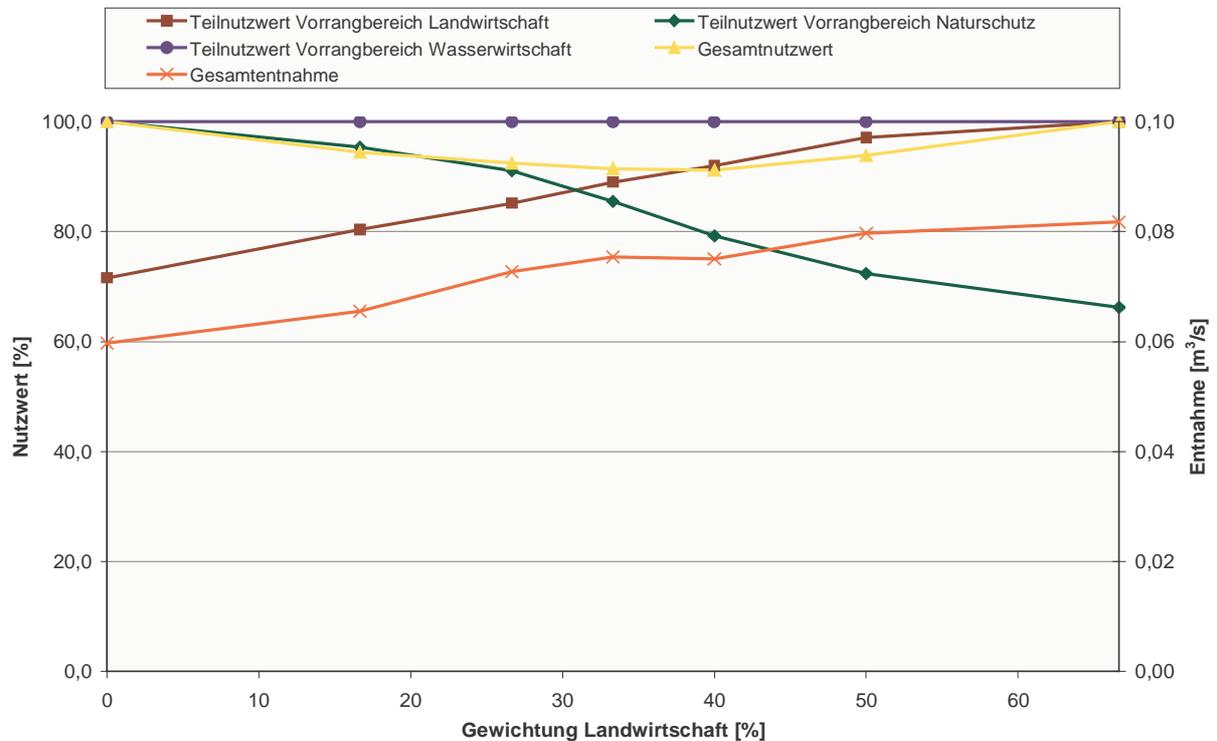


Abb. 7.1: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren und freier Gesamtentnahme

Aus der Zusammenstellung der 7 Optimierungsläufe in obiger Abbildung und den detaillierten Ergebnissen kann man folgende Schlüsse ziehen:

- Die Gesamtentnahme steigt mit steigender Gewichtung des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft, da dieser sein Optimum bei größeren Flurabständen hat.
- Der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft steigt mit steigender Gewichtung. Analog dazu sinkt der Schwerpunktbereich Naturschutz bei sinkender Gewichtung des Schwerpunktbereichs Naturschutz.
- Der Gesamtnutzwert ist tendenziell am schlechtesten, wenn alle Schwerpunktbereiche mit ähnlichem Gewicht optimiert werden sollen. Bei einer Gewichtung von 0% für einen der Schwerpunktbereiche erreicht der Gesamtnutzwert 100%, da die Pumpraten für den entsprechenden anderen Schwerpunktbereich optimal gewählt werden können.
- Der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Wasserwirtschaft bleibt konstant bei 100%.

7.5.6.2 Variation der Gewichtung bei vorgegebener Gesamtentnahme

Es werden nun verschiedene Gesamtentnahmen vorgegeben. Die erste Rate ist 50 l/s und somit etwas tiefer als die ermittelte Rate bei freier Optimierung und $66,67\%$ Gewichtung des Naturschutzes. Die Aufgabe ist nun die Gesamtentnahme von 50 l/s optimal auf die beiden Brunnen zu verteilen.

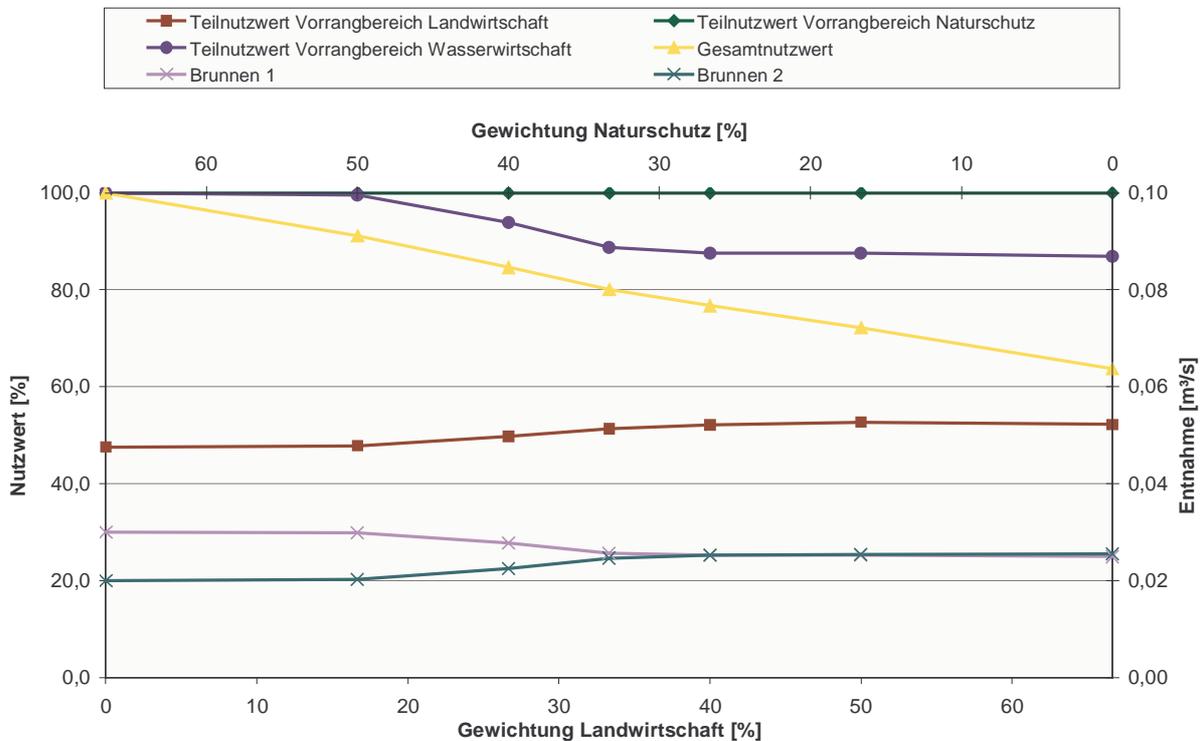


Abb. 7.1: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren und vorgegebener Gesamtentnahme von $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$

Es können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die vorgegebene Gesamtentnahme ist so gering, dass eine Optimierung nahezu unmöglich ist. Der Schwerpunktbereich Naturschutz bleibt konstant trotz Variation des Gewichtungsfaktors zwischen 0 und $66,67\%$ auf einem Teilnutzwert von 100% , der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft steigt geringfügig von $47,5\%$ auf $52,2\%$, damit ist der Gesamtnutzwert nicht aussagekräftig.
- Der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Wasserwirtschaft sinkt von 100% auf $86,9\%$ bei steigender Gewichtung des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft. Offensichtlich ist ein ausgeglichenes Verhältnis der Entnahmeraten der beiden Brunnen vorteilhaft für den Schwerpunktbereich Landwirtschaft. Für die Wasserversorgung ist es besser, wenn an Brunnen 1 mehr Wasser entnommen wird als an Brunnen 2.

Die zweite vorgegebene Rate ist 90 l/s. Sie ist etwas höher als die ermittelte Rate bei freier Optimierung und 66,67% Gewichtung des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft.

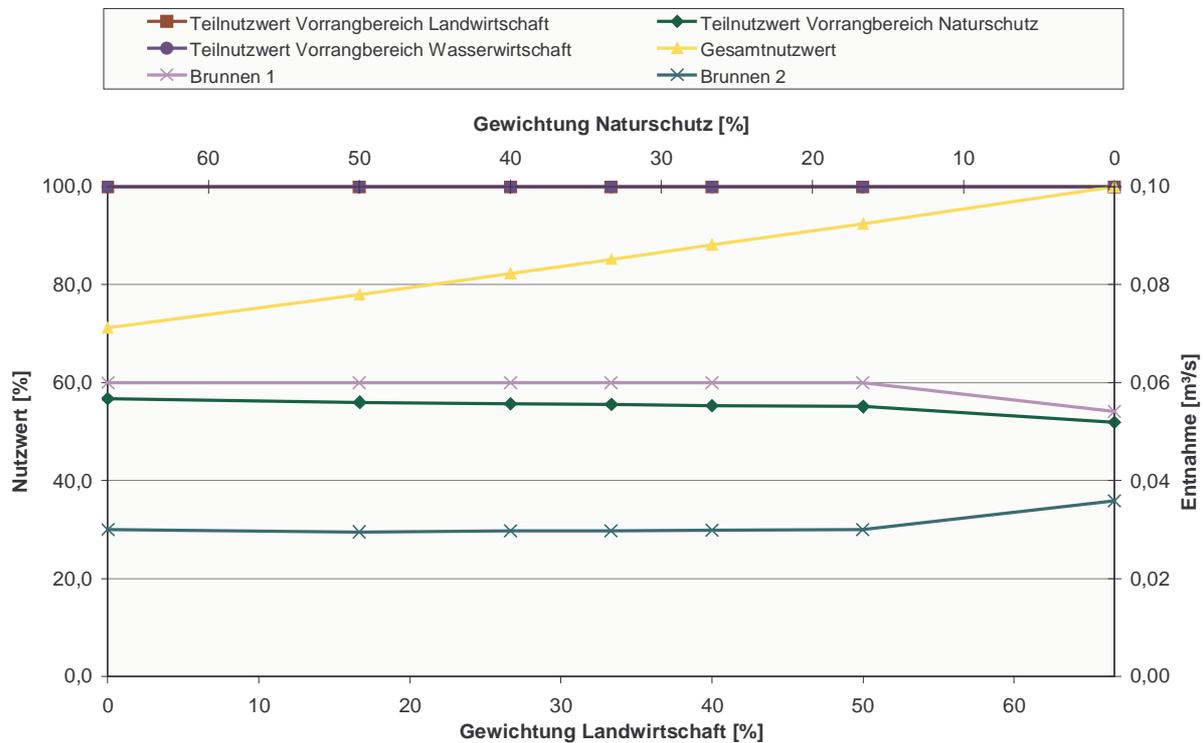


Abb. 7.2: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren und vorgegebener Gesamtentnahme von $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$

Die Schlussfolgerungen sehen folgendermaßen aus:

- Die vorgegebene Gesamtentnahme ist so hoch, dass eine Optimierung nahezu nicht möglich ist. Der Schwerpunktbereich Landwirtschaft bleibt konstant auf einem Teilnutzwert von 100%, der Schwerpunktbereich Naturschutz sinkt geringfügig von einem Teilnutzwert von 56,7% auf 51,9%, damit ist der Gesamtnutzwert nicht aussagekräftig.
- Der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Wasserversorgung bleibt konstant bei 100%, eine Optimierung der beiden Pumpraten bei einer Gesamtentnahme von 90 l/s bringt keine Vorteile, deshalb ergeben sich auch keine unterschiedlichen Pumpratenverteilungen für unterschiedliche Gewichtungen der Landwirtschaft bzw. des Naturschutzes.

Die dritte vorgegebene Entnahme liegt zwischen den beiden vorangegangenen Entnahmen bei 70 l/s.

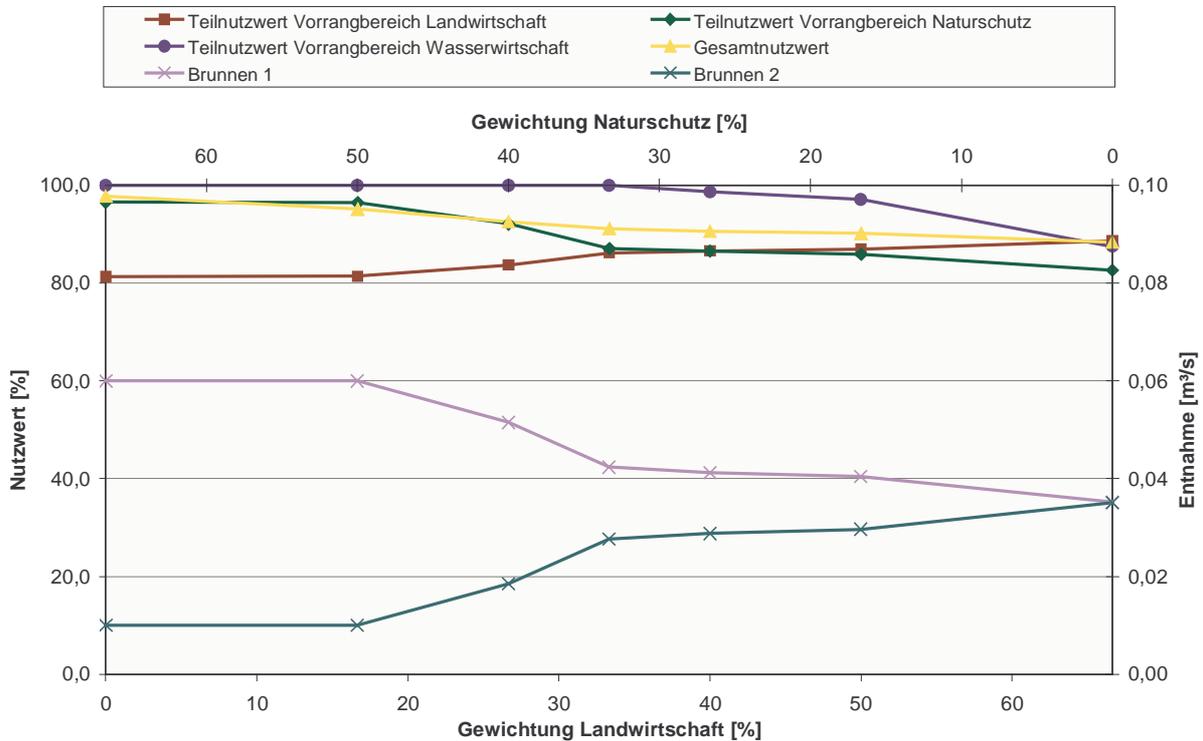


Abb. 7.3: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren und vorgegebener Gesamtentnahme von $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$

Es lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Eine Optimierung ist möglich. Der Gesamtnutzwert sinkt von 97,7% auf 88,3 % bei steigender Gewichtung des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft. Die Teilnutzwerte der einzelnen Gruppen steigen generell bei höherer Gewichtung der jeweiligen Gruppe.
- Bei hoher Gewichtung des Schwerpunktbereichs Landwirtschaft ist das Verhältnis der beiden Brunnenentnahmen ausgeglichen. Damit sinkt aber der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Wasserwirtschaft.
- Bei einer hohen Gewichtung des Naturschutzes wird die Entnahme hauptsächlich auf Brunnen 1 verlegt, der möglichst weit entfernt von den Bewertungsbrunnen des Naturschutzes liegt.

7.5.6.3 Variation der Zielfunktion „Nitrat“ bei freier Gesamtentnahme

Für den Wasserqualitätsparameter „Nitrat“ wird die obere Zielgröße (vgl. Tab. 7.3) von 30,0 mg/l auf 20,0 mg/l verringert, d.h. die Konzentration des Nitrates im Mischwasser darf 20,0 mg/l nicht überschreiten, um noch optimal zu sein. Ansonsten sind alle Parameter gleich wie bei den voran gegangenen Optimierungen. Die Gesamtentnahme ist vom Optimierungssystem frei wählbar.

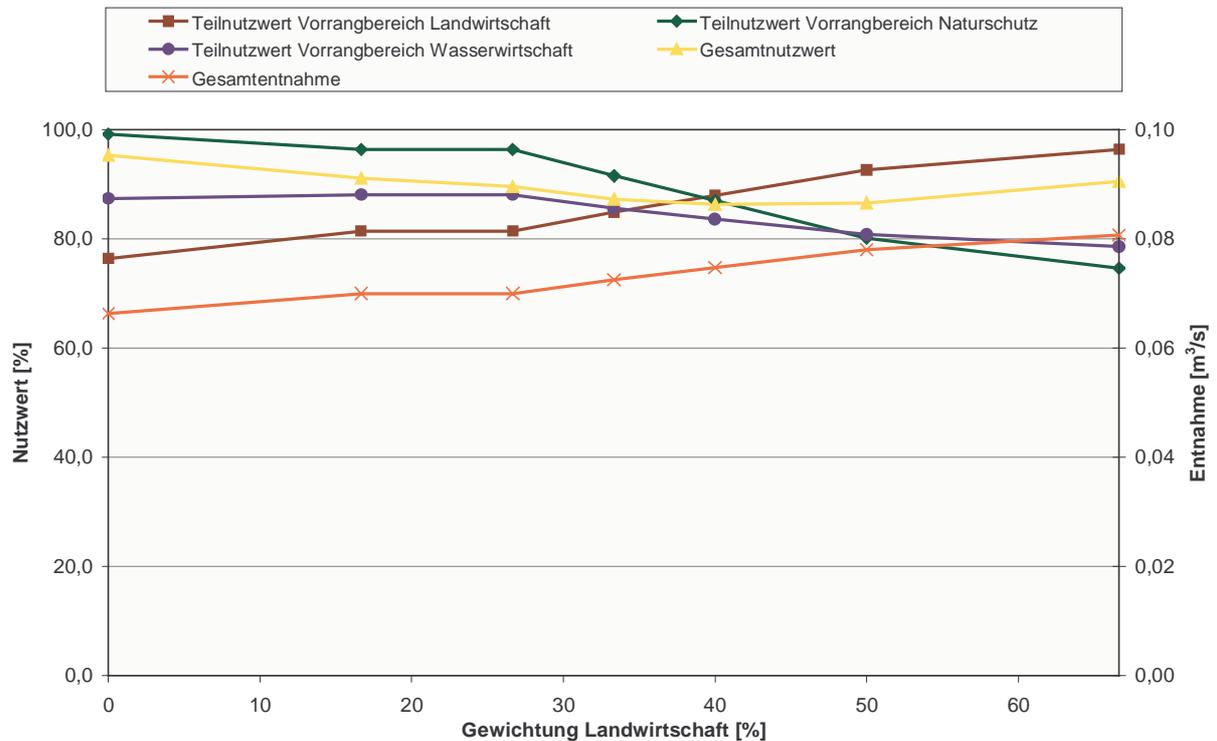


Abb. 7.1: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren, freier Gesamtentnahme und veränderter Zielfunktion 4

Vergleicht man die Optimierungsergebnisse, erkennt man ihre sensible Reaktion auf die Veränderung:

- Wird die Gewichtung der Landwirtschaft gesteigert, so erhöht sich die Gesamtentnahme, da größere Flurabstände für die landwirtschaftlichen Bewertungspunkte optimaler sind als eine niedrige Gesamtentnahme.
- Da die Zielfunktion für Nitrat geändert wurde, erreicht die Wasserversorgung nur noch einen Teilnutzwert von 88%, der bei steigender Entnahme abnimmt.
- Keiner der drei Schwerpunktbereiche erreicht nun mehr einen Teilnutzwert von 100%, beim Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft sinkt er um ca. 10-20%. Die Optimierung ist deshalb eher eine Abwägung zwischen allen drei Schwerpunktbereichen geworden.
- Die Bandbreite der Gesamtentnahme bewegt sich in einem engeren Rahmen als dies vorher der Fall war.

7.5.6.4 Variation der Zielfunktion „Naturschutz“ bei freier Gesamtentnahme

Bei der für den Schwerpunktbereich Naturschutz relevanten Zielfunktion (siehe Tab. 7.2) wird die obere Zielgröße von 0,8 m auf 0,6 m verringert, d.h. die Flurabstände an den Bewertungspunkten sollten 0,6 m nicht überschreiten, um noch optimal zu sein. Ansonsten sind alle Parameter identisch zu den vorangegangenen (aber keine Variation der Zielfunktion „Nitrat“).

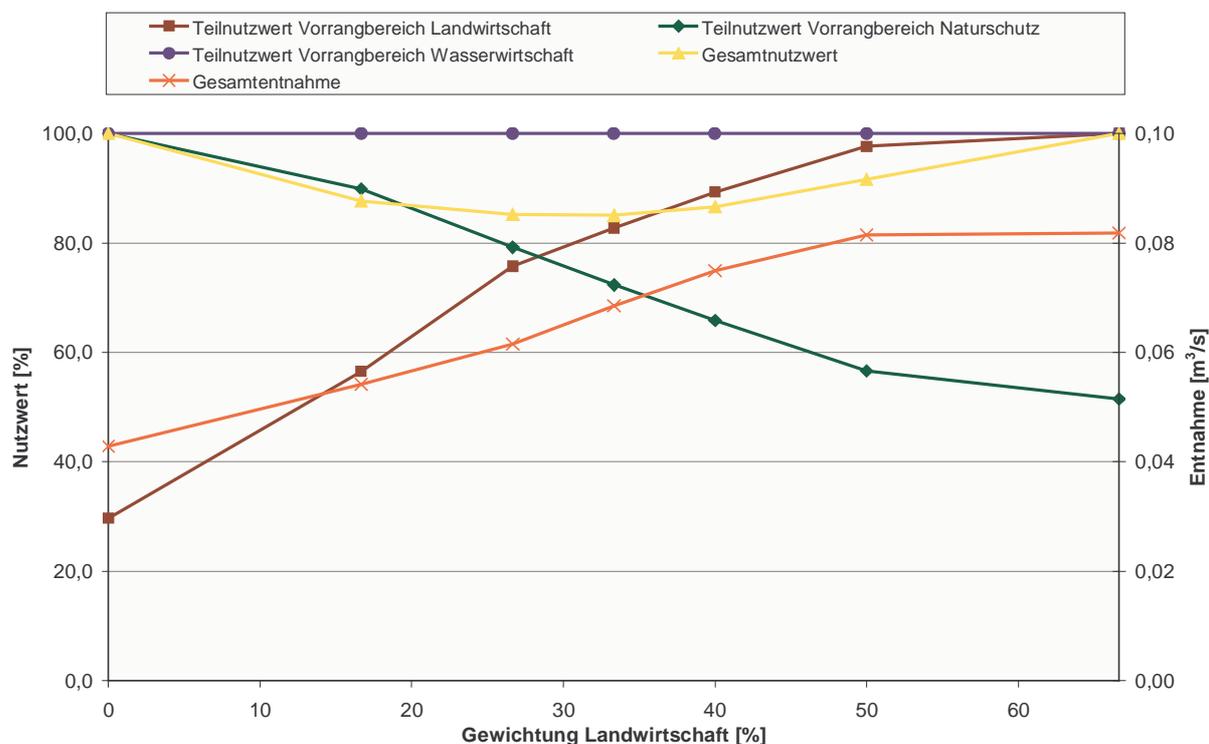


Abb. 7.1: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren, freier Gesamtentnahme und veränderter Zielfunktion 1 (Variation 1)

Die Reaktion auf die Veränderung ist ebenfalls unübersehbar:

- Die Teilnutzwerte der Schwerpunktbereiche Landwirtschaft und Naturschutz fallen bei geringer werdender Gewichtung viel stärker ab, die Tiefstwerte sind geringer. Es können dennoch bei beiden Schwerpunktbereichen und entsprechend hoher Gewichtung 100% erreicht werden.
- Die Gesamtentnahme ist generell geringer. Der Maximalwert bleibt jedoch gleich, da sich bei einer maximalen Entnahme von 81 l/s optimale Verhältnisse für die Landwirtschaft ergeben.
- Die Tendenzen der Teilnutzwerte sind erhalten geblieben.

7.5.6.5 Weitere Einschränkung der Zielfunktion „Naturschutz“ bei freier Gesamtentnahme

Bei der für den Schwerpunktbereich Naturschutz relevanten Zielfunktion (siehe Tab. 7.2) wird die untere sowie die obere Zielgröße auf 0,5 m gesetzt, d.h. die Flurabstände des Schwerpunktbereichs müssen exakt 0,5 m sein, um als optimal zu gelten. Ansonsten sind alle Parameter identisch zum vorangegangenen Fall. Mit der Zusammenlegung der oberen und unteren Zielgröße für den Naturschutz ist nur ein optimaler Flurabstand vorhanden. Damit soll getestet werden, wie der Optimierungsalgorithmus auf diese sehr enge Zielvorgabe reagiert.

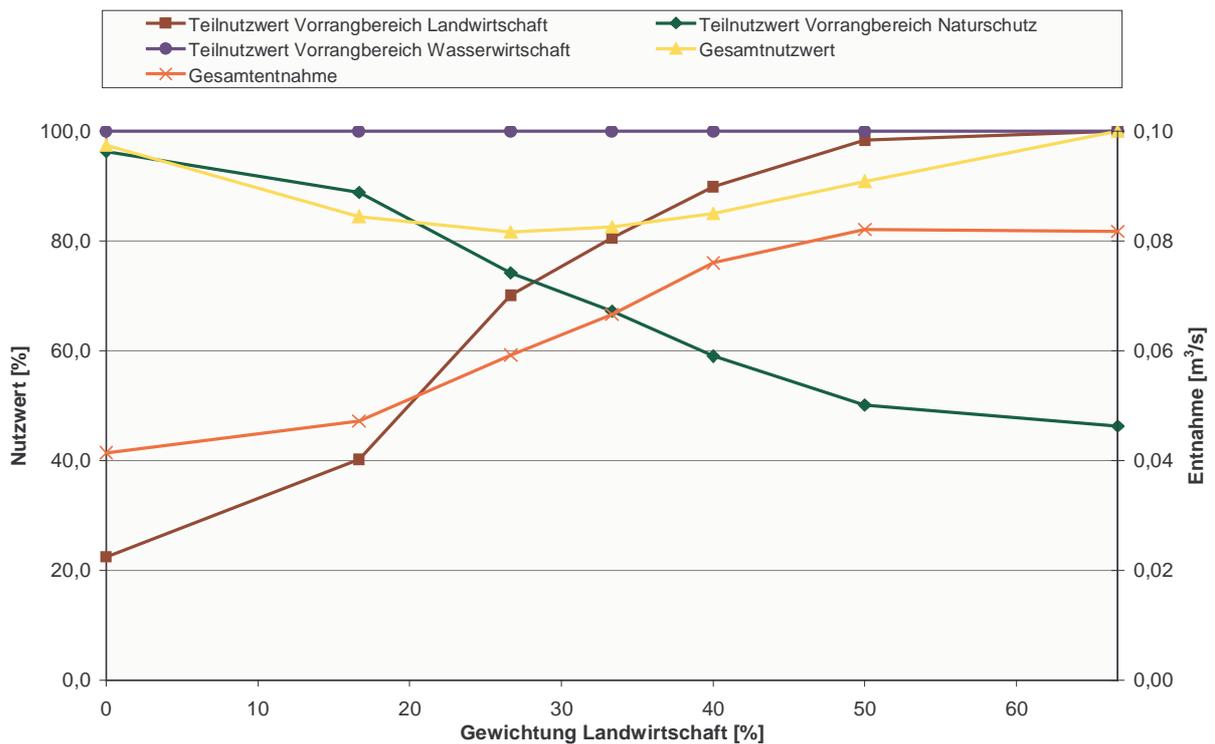


Abb. 7.1: Teilnutzwerte und Entnahme bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren, freier Gesamtentnahme und veränderter Zielfunktion 1 (Variation 2)

Es fällt folgendes auf:

- Der Teilnutzwert des Schwerpunktbereichs Naturschutz erreicht keine 100% mehr. Bei genauerer Analyse ergibt sich bei einer Gewichtung von 66,6%, dass Punkt 1 bei 0,49 m liegt, Punkt 2 bei 0,55 m. Es ist also keine Optimierung auf 100% möglich, da hydraulisch nicht dieselbe Piezometerhöhe an beiden Knoten erreicht werden kann.
- Die Teilnutzwerte der Schwerpunktbereiche Landwirtschaft und Naturschutz fallen noch stärker bei geringer werdender Gewichtung, die Tiefstwerte sind noch extremer (im Vergleich zur vorangegangenen Variation der Zielfunktion „Naturschutz“).
- Die Gesamtentnahme ist noch geringer bei hoher Gewichtung des Schwerpunktbereichs Naturschutz (ebenfalls im Vergleich zur vorangegangenen Variation).

7.5.6.6 Ergebnis der Sensitivitätsuntersuchungen

Als Ergebnis der Sensitivitätsuntersuchung kann zusammengefasst werden:

- Der Gesamtnutzwert ist nicht immer aussagefähig, es sollte nach der Optimierung auch auf die Ergebnisse der Schwerpunktbereiche geachtet werden um festzustellen, wie der Gesamtnutzwert zustande kommt. **Dies wird durch die Einbeziehung von Composite Programming im Anwendungsfall für das Donauried erreicht.** Diese Methode verhindert, dass ein optimales Ergebnis nur für einen Schwerpunktbereich erreicht wird, obwohl eine ausgeglichene Gewichtung gewählt wurde, was nicht im Sinne einer ausgewogenen Optimierung ist.
- Bei vorgegebener Gesamtentnahme ist eine Optimierung nicht immer für alle Bewertungsgrößen möglich, wenn z.B. die Entnahme so hoch oder tief liegt, dass eine Bewertungsgröße den optimalen Bereich gar nicht erreichen kann. Eine Variation der Gesamtentnahme kann hierüber Aufschluss geben.
- Der Gesamtnutzwert ist das Endergebnis eines vom Anwender definierten Bewertungssystems. Das tatsächliche Maximum des Gesamtnutzwerts, welches mit diesem Bewertungssystem und dem Grundwassermodell erreicht werden kann, muss nicht 100% betragen, sondern kann auch deutlich darunter liegen.
- Die Optimierbarkeit eines Systems hängt auch von den hydraulischen Verhältnissen ab. Durch die Entnahme an den verfügbaren Brunnen können nur hydraulisch mögliche Absenkungen eingestellt werden.
- Auch die Wahl der Zielfunktionen entscheidet über die Möglichkeiten einer Optimierung. Werden die optimalen Bereiche zu weit von den überhaupt erreichbaren Werten gewählt, kann eine Optimierung schwierig oder unmöglich werden. Ist die Bandbreite der optimalen Bewertungsgrößen in der Zielfunktion zu klein, dann ist die Optimierung erschwert.

7.6 Anwendung im Donauried

7.6.1 Übersicht

Mit Hilfe des entwickelten und getesteten Optimierungssystems sollen nun die Grundwasserentnahmen der Landeswasserversorgung im Donauried optimiert werden. Dazu wurde in den Kapiteln 5 und 6 ein Bewertungsverfahren für stationäre Verhältnisse entwickelt. Neben dem Bewertungssystem kommt das geeichte und prognosefähige Grundwassermodell für das Einzugsgebiet des Donaurieds zum Einsatz. Die Berechnung erfolgt für stationäre, mittlere Verhältnisse. Die mittlere Neubildung wurde für das Donauried aus langjährig vorliegenden Daten ermittelt. Für die Optimierung der fassungsspezifischen Entnahmen muss zuerst folgendes definiert werden:

- die obere und untere Grenze der Entnahme pro Fassung,
- die Gesamtentnahme aus allen Fassungen,
- die Geländeoberkante und
- die Einstellungen des Optimierungsalgorithmus in PEST.

Die oberen Grenzen der einzelnen Entnahmeraten wurden mit Hilfe des Grundwassermodells bestimmt, in dem die maximale Ergiebigkeit bei gleichzeitigem Betrieb der Fassungen bestimmt wurde. Diese maximalen Förderraten können laut Modell unter den stationären Randbedingungen auf unbestimmte Zeit aus dem Modellgebiet entnommen werden und gewährleisten somit, dass die gewünschte Gesamtentnahme realisierbar ist. Diese Grenzen dürfen nicht mit den Grenzen in Tab. 6.2 verwechselt werden. Hier liegt eine Entnahme aus allen Fassungen gleichzeitig vor, was die maximalen Förderraten der Einzelentnahmen reduziert, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Die minimalen Förderraten orientieren sich wiederum an den technischen Randbedingungen.

Tab. 7.1: Grenzen der Entnahme pro Fassung bei stationärer Optimierung (Mittelwasserverhältnisse)

	Minimale Entnahmerate [l/s]	Maximale Entnahmerate [l/s]
Fassung 1	70	426
Fassung 2	50	483
Fassung 3	70	285
Fassung 4	50	132
Fassung 5 Kies	50 (20 ¹⁾)	177
Fassung 6	70	129

¹⁾ Die Mindestentnahme von 50 l/s aus den Kiesbrunnen der Fassung 5 wurde im Projektfortschritt erst vergleichsweise spät festgelegt, nachdem sich bei einem praktischen Versuch gezeigt hatte, dass die bis dahin geltende Mindestförderrate von 20 l/s zu gering angesetzt war. Die nachfolgend aufgeführten Optimierungen wurden vor der Umstellung durchgeführt und beinhalten daher noch die Mindestförderrate von 20 l/s an dieser Fassung.

Bei den Optimierungen mit vorgegebener Gesamtentnahme sind die für das Donauried relevanten Gesamtentnahmen zu definieren. Die langjährige durchschnittliche Entnahme im Donauried beträgt 940 l/s (1993-2003). Die Entnahme schwankt grob zwischen 700 und 1300 l/s. Bei den Optimierungen wird davon ausgegangen, dass an den Karstbrunnen der Fassung 5 immer 100 l/s entnommen werden. Diese Entnahme wird nicht optimiert und ist deshalb in Tab. 7.1 mit „+100“ bei der Gesamtentnahme gekennzeichnet. Wird nur „Fassung 5“ in Tabellen usw. angegeben, handelt es sich um die im Kiesgrundwasserleiter verfilterten Brunnen. Die Geländeoberkante des Donaurieds schwankt im Modellgebiet zwischen ca. 460 und 440 m. ü. NN, wobei das Modellgebiet von West nach Ost abfällt. Die Geländeinformationen liegen als einzelne Vermessungspunkte vor, aus denen durch Interpolation die Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet ermittelt wurde. Die Optimierung in PEST lässt sich durch zahlreiche Parameter steuern. Die wichtigsten sind in Tab. 7.2 wiedergegeben.

Tab. 7.2: Einstellungsparameter von PEST (Φ steht für die objective function)

Parameter	Wert
„Maximum number of consecutive failures to lower Φ “	3
„Number of consecutive iterations with minimal parameter change“	4
„Maximum number of optimisation iterations“	10

Anhand dieser Parameter lässt sich das Ende der Optimierung steuern. Die Optimierung wird beendet, wenn:

- die objective function innerhalb von 3 Optimierungsiterationen nicht weiter gesenkt werden kann,
- innerhalb von 4 Iterationen die Parameter sich nur noch minimal ändern oder
- die Gesamtzahl von 10 Optimierungsiterationen überschritten wird.

Dabei ist zu beachten, dass Optimierungsiterationen keinesfalls mit Modellläufen zu verwechseln sind. Eine Optimierungsiteration besteht immer aus mehreren Modellläufen.

Den Optimierungen für stationäre Verhältnisse liegen dieselben Annahmen und Randbedingungen zugrunde, die auch für die Bewertungen in Kap. 6 Anwendung fanden (Gesamtbereitstellung Wasserwerk Langenau = 2162 l/s; Entnahme in Burgberg = 340 l/s; Ausgleich der fehlenden Wasserbereitstellung durch die Entnahme von Donauwasser; mittlere Nitrat- und Härtewerte; u.s.w.). Die Optimierungen sind daher streng genommen auch nur für diese Randbedingungen gültig.

7.6.2 Optimierung ohne festgelegte Gesamtentnahme

Bei der Optimierung ohne festgelegte Gesamtentnahme kann der Optimierungsalgorithmus die Gesamtförderrate frei wählen. Die Grenzen der einzelnen Fassungsentnahmen müssen jedoch eingehalten werden. Daraus folgt, dass das erwartete Ergebnis im Hinblick auf den Gesamtnutzwert das „bestmögliche“ sein sollte. Bei einer freien Optimierung ergibt sich demnach die in Tab. 7.1 dargestellte Entnahmeverteilung.

Tab. 7.1: Entnahmeverteilung für die freie Optimierung [l/s].

	Entnahme [l/s]
Fassung 1	276
Fassung 2	137
Fassung 3	70
Fassung 4	76
Fassung 5 Kies	20
Fassung 5 Karst	100
Fassung 6	82
Gesamt	661+100

Die optimale Gesamtentnahmerate aus dem Kiesgrundwasserleiter unter stationären mittleren Verhältnissen ergibt sich zu 661 l/s, und liegt somit tiefer als die Gesamtmenge, die in der Regel entnommen wird. Allerdings bedeutet dieses Ergebnis auch, dass es für das Gesamtsystem vorteilhafter ist, diese Menge zu entnehmen als kein Wasser oder eine geringere Menge.

Die Entnahmemenge teilt sich dabei ungleichmäßig auf die verschiedenen Fassungen auf. An Fassung 1 liegt die Entnahme bei 276 l/s, das ist die höchste einzelne Fassungsentnahme. Die Entnahme an der Fassung 1 beeinflusst vor allem den Flurabstand unter Flächen der Wertstufe Landwirtschaft 1 im Zustrombereich zur Fassung sowie in geringerem Maße den Flurabstand unter nitratreichen Deckschichten im Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft. Für die Teilnutzwerte dieser beiden Gruppen sind tiefere Grundwasserstände von Vorteil.

Für die Fassung 2, die vollständig von den Flächen mit den nitratreichen Deckschichten im Schwerpunktbereich der Wasserwirtschaft umgeben ist, ergibt sich eine optimale Bewirtschaftung von 137 l/s. Dass die optimale Förderrate nicht höher liegt, liegt daran, dass diese Fassung im direkten Zustrombereich des Schwerpunktbereichs Naturschutz Wertstufe 1 liegt, wo oberflächennahe Grundwasserstände erforderlich sind. Die vom Optimierungssystem vorgeschlagene Entnahmerate ist als Kompromiss zwischen den sich widersprechenden Anforderungen zu verstehen.

Die Entnahme an Fassung 3 liegt optimalerweise bei ihrer Mindestförderrate. Dies ist auf die im Abstrom gelegenen Flächen im Schwerpunktbereich Naturschutz Wertstufe 2 zurückzuführen. Die dort erwünschten hohen Grundwasserstände können nur erreicht werden, wenn aus der Fassung 3 vergleichsweise wenig Wasser entnommen wird.

Die Entnahme an Fassung 4 wird mit 76 l/s etwa in der Mitte zwischen minimaler und maximaler Entnahme gewählt und stellt einen Kompromiss zwischen den Anforderungen an den Flurabstand im Umfeld und dem für die Wasserversorgung bedeutenden Kostenaspekt dar. Wie in Kap. 6.4 gezeigt wurde, sind aus landwirtschaftlicher und naturschutzfachlicher Sicht auch höhere Entnahmeraten sinnvoll.

Für die Kiesbrunnen der Fassung 5 ergibt sich eine optimale Entnahmerate von 20 l/s (vgl. Fußnote zu Tab. 7.1), was dem minimalen Wert entspricht. Ausschlaggebend ist auch hier wie im Fall der Fassung 3 die direkte Nachbarschaft der Fassung zu naturschutzrelevanten Flächen der Wertstufe 2. Gleichzeitig spricht insbesondere der hohe Nitratgehalt des Rohwassers dieser Fassung (zwischen 1988 und 2000 im Mittel 47 mg/l) gegen eine höhere Entnahme.

Die optimale Förderrate der Fassung 6 beträgt 82 l/s. Limitierend auf die Entnahme an dieser Fassung wirkt sich die Präsenz der südlich daran anschließenden Naturschutz Wertstufe 2-Fläche aus.

Der Gesamtnutzwert sowie die Teilnutzwerte ergeben sich bei freier Optimierung wie in Tab. 7.2 dargestellt.

Tab. 7.2: Zielerfüllungsgrade und Nutzwerte für die freie Optimierung (MW)

Zielebene	Kriterium (Wertstufe)	Zielerfüllungsgrad/ Teilnutzwert/ Gesamtnutzwert [%]
3	Reduzierung der Nitratkonzentration im Mischwasser	100
	Reduzierung der Gesamthärte im Mischwasser	100
	Vermeidung von Nitrat-Auswaschungen	40
	Minimierung der entstehenden Kosten	48
	Optimale Flurabstände im Schwerpunktbereich Landwirtschaft Wertstufe 1	69
	Optimale Flurabstände im Schwerpunktbereich Landwirtschaft Wertstufe 2	48
	Optimale Flurabstände im Schwerpunktbereich Landwirtschaft Wertstufe 3	37
	Optimale Flurabstände im Schwerpunktbereich Landwirtschaft Wertstufe 4	49
	Optimale Flurabstände im Schwerpunktbereich Naturschutz Wertstufe 1	57
	Optimale Flurabstände im Schwerpunktbereich Naturschutz Wertstufe 2	38
2	Teilnutzwert Wasserwirtschaft	78
	Teilnutzwert Landwirtschaft	57
	Teilnutzwert Naturschutz	50
1	Gesamtnutzwert	58

Der Gesamtnutzwert der freien Optimierung für stationäre Verhältnisse (MW) beträgt 58%. Der mit Hilfe des Optimierungssystems bestimmte Gesamtnutzwert ist damit der größte im Vergleich zu den systematischen Entnahmevariationen aus Kap. 6. Dies zeigt, dass eine optimierte Entnahmeverteilung sogar noch größere Gesamtnutzwerte liefert als keine Entnahme aus dem Donauried. Das Gesamtergebnis stellt sich für die einzelnen Nutzer aber unterschiedlich dar. Die Wasserversorgung erreicht das beste Ergebnis mit 78%, der Naturschutz weist einen Teilnutzwert von 50% auf, dazwischen liegt die Landwirtschaft mit 57%.

Im Schwerpunktbereich der Wasserwirtschaft ergibt sich ein sehr heterogenes Ergebnis. Die Bewertungsgrößen "Minimierung der Nitratkonzentration" und "Minimierung der Gesamthärte" erreichen jeweils 100%. Die Bewertungsgrößen der Gruppen "Vermeidung von Auswaschungen aus nitratreichen Deckschichten" und "Minimierung der Kosten" erreichen allerdings nur 40 bzw. 48%. Diese Heterogenität der Zielerfüllungsgrade hat allerdings keine negativen Auswirkungen auf den Teilnutzwert für die Wasserwirtschaft, da Composite Programming nur auf Zielebene 2 angewandt wird. Die gute Bewertung der Nitratkonzentration bzw. Gesamthärte war zu erwarten, da das Optimierungssystem die Fassungsentnahmen frei wählen kann und die vergleichsweise hohe Gewichtung der einzelnen Bewertungsgrößen der Wasserwirtschaft dann dazu führt, dass sich optimale Mischungskonzentrationen ergeben. Die Bewertungsgrößen der "Minimierung der Auswaschungen aus nitratreichen Deckschichten" befinden sich im direkten Umfeld der Fassungen, so dass für diese Gruppe hohe Entnahmen eher positiv sind. Da aber die Gesamtentnahme von 661 l/s vergleichsweise gering ist, erhält diese Gruppe eine eher schlechte Bewertung. Die Bewertungsgröße "Minimierung der Kosten" erreicht "nur" einen Teilnutzwert von 48%, dies ist etwas überraschend, da das Optimierungssystem die Entnahme an Fassung 4 (von der der Zielerfüllungsgrad direkt abhängt) frei wählen kann und die Gruppe mit 6% eine vergleichsweise hohe Gewichtung am Gesamtnutzwert besitzt. Offensichtlich ist aber eine höhere Entnahme an Fassung 4 von deutlichem Vorteil für die Bewertungsgrößen in den Schwerpunktbereichen Naturschutz und Landwirtschaft.

Im Schwerpunktbereich der Landwirtschaft ist das Ergebnis homogener verteilt als bei der Wasserwirtschaft. Die ZEG erreichen Werte zwischen 69 und 37%. Positiv ist dabei das gute Abschneiden der Gruppe "Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 1". Diese wichtigste Gruppe für die Landwirtschaft (Gewichtung: 0,5) mit der flächenmäßig größten Ausdehnung erreicht den besten Zielerfüllungsgrad von 69%, der deutlich über dem bei Nullentnahme (Tab. 6.1) liegt. Lediglich der Teilnutzwert der Gruppe "Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 3" fällt mit 37% etwas zurück. Die verbleibenden beiden ZEG liegen knapp unter 50%. Gegenüber der Nullentnahme ergibt sich ein um 3 Prozentpunkte höherer Teilnutzwert.

Im Schwerpunktbereich des Naturschutzes ergeben sich durch die Optimierung vergleichsweise gute Zielerfüllungsgrade. Die Gruppe "Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 1", welche für die Bewertung der weitaus größten Fläche innerhalb des Schwerpunktbereichs Naturschutz verantwortlich ist und zudem die größere Gewichtung hat

($g = 0,6$), wird mit einem ZEG von 57% sehr gut bewertet (Nullentnahme: 44%). Die Gruppe "Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 2" erreicht mit 38% den höchsten ZEG aller Bewertungen in Kap. 6. Der Teilnutzwert für den Naturschutz liegt insgesamt um 9 Prozentpunkte höher als bei Nullentnahme. Die optimierte Entnahme hat damit ihre größten positiven Auswirkungen auf die Ansprüche des Naturschutzes.

7.6.3 Optimierungen bei vorgegebener Gesamtentnahme

Die Optimierung erfolgte nun für eine vorgegebene Gesamtentnahme, d.h. der Optimierungsalgorithmus kann die Gesamtentnahme nicht mehr frei wählen, sondern muss eine optimale Verteilung auf die Fassungen finden. Die Optimierung erfolgte zum einen für eine Entnahme von 1000 l/s sowie für 700 l/s und 1300 l/s. Damit wurde eine große Bandbreite der möglichen Entnahmen im Donauried abgedeckt.

Die optimierten Entnahmeverteilungen können Tab. 7.1 entnommen werden.

Tab. 7.1: Entnahmeverteilung für die Optimierung der vorgegebenen Gesamtentnahmen von 700, 1000 und 1300 l/s.

	Entnahme [l/s]		
Fassung 1	291	417	426
Fassung 2	85	209	326
Fassung 3	70	70	239
Fassung 4	64	69	59
Fassung 5 Kies	20	20	21
Fassung 5 Karst	100	100	100
Fassung 6	70	115	129
Gesamt	600+100	900+100	1200+100

Vergleicht man zunächst das Ergebnis der Optimierung für eine Gesamtentnahme von 700 l/s mit der freien Optimierung, so erkennt man in etwa Fassungsentnahmen wie bei der freien Optimierung. Diese Gesamtmenge ist bei der vorgegebenen Entnahme um 61 l/s geringer. An Fassung 1 wird wiederum die höchste Menge entnommen, gefolgt von den Entnahmen an den Fassungen 2 und 6. An den Fassungen 3 und 5 wird wieder die minimal mögliche Menge entnommen und an der Fassung 4 wird ca. die Hälfte der möglichen Menge entnommen.

Bei der Steigerung der Gesamtentnahme von 700 l/s auf 1000 l/s werden die Entnahmen an Fassung 1 und 6 fast bis auf den maximalen Wert gesteigert. Diese Fassungen sind, wie in Kap. 6.4 erläutert, diejenigen mit den geringsten negativen Auswirkungen auf den Gesamtnutzwert bei einer Entnahmesteigerung. Die optimale Entnahme bei freier Optimierung liegt hier bereits relativ hoch (276 l/s bzw. 82 l/s). Um aber die Differenz von zusätzlichen 300 l/s aus dem Donauried zu entnehmen, reicht die Steigerung der Entnahmen an diesen beiden Fassungen nicht aus. Deshalb wird die Entnahme an Fassung 2 um den verbleibenden Betrag gesteigert. Ihre Entnahme war bereits bei der freien Optimierung mit 137 l/s vergleichsweise hoch. Dass diese höhere Entnahme keine allzu negativen Auswirkungen hat, liegt

daran, dass die Bewertungsgrößen der Gruppe "Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 1" im Schwerpunktbereich Naturschutz erst bei höheren Entnahmen an der Fassung 2 nachhaltig beeinträchtigt werden. Mit diesen Steigerungen der Entnahmen im Vergleich zur freien Optimierung ist es möglich 1000 l/s aus dem Donauried zu entnehmen, ohne den Gesamtnutzwert allzu stark abzusenken.

Soll nun die Gesamtentnahme von 1000 l/s auf 1300 l/s gesteigert werden, müssen die Entnahmen an weiteren Fassungen erhöht werden. Die Entnahmen an Fassung 1 und 6 waren bereits nahe der maximalen Entnahmen, sie werden nun auf die jeweils maximale Entnahme gesetzt, was aber lediglich eine zusätzliche Menge von 23 l/s bringt. Die verbleibenden 277 l/s zu den angestrebten 1300 l/s werden dann durch eine Steigerung der Entnahmen an Fassung 2 und 3 erreicht. An ihnen werden nun 326 l/s bzw. 239 l/s entnommen, wobei die Entnahmesteigerung an der Fassung 3 größer ist als an der Fassung 2. Die Veränderungen der Entnahmen an den Fassungen 4 und 5 sind untergeordnet.

Aus den vorgestellten 4 Optimierungsergebnissen ergibt sich eine Priorität bezüglich der Entnahmesteigerungen an den Fassungen bei steigender Gesamtentnahme, die als generelle Empfehlung für die Bewirtschaftung des Donaurieds unter den oben genannten Randbedingungen abgeleitet werden kann. Zunächst sollte die Entnahme an Fassung 1 gesteigert werden. Anschließend an Fassung 6 und 2. Bei einer weiteren Erhöhung der vorgegebenen Entnahmemenge muss die Entnahme an Fassung 3 ebenfalls gesteigert werden. Die Entnahme an der Fassung 4 wird mit ca. 60-70 l/s als optimal bewertet und nur leicht variiert. Eine Entnahme an Fassung 5 sollte laut Optimierungssystem möglichst vermieden werden.

Für die in Tab. 7.1 gezeigten Entnahmen ergeben sich die in Tab. 7.2 dargestellten Nutzwerte.

Tab. 7.2: Nutzwerte für die Optimierung der vorgegebenen Gesamtentnahmen von 700, 1000 und 1300 l/s

Zielebene	Kriterium (Wertstufe)	700 l/s	1000 l/s	1300 l/s
3	Reduzierung der Nitratkonzentration	100	70	17
	Reduzierung der Gesamthärte	100	100	100
	Vermeidung von Auswaschungen	32	54	78
	Minimierung der Kosten	72	62	82
	Optimale Flurabstände Landwirtschaft 1	69	70	71
	Optimale Flurabstände Landwirtschaft 2	47	53	41
	Optimale Flurabstände Landwirtschaft 3	37	38	38
	Optimale Flurabstände Landwirtschaft 4	52	36	1
	Optimale Flurabstände Naturschutz 1	56	56	45
	Optimale Flurabstände Naturschutz 2	40	27	9
2	Teilnutzwert Wasserwirtschaft	81	74	69
	Teilnutzwert Landwirtschaft	56	59	53
	Teilnutzwert Naturschutz	50	45	31
1	Gesamtnutzwert	58	56	46

Zunächst wird der Gesamtnutzwert betrachtet, dieser ist bei der Gesamtentnahme von 700 l/s mit 58% mit dem Gesamtnutzwert bei freier Optimierung identisch. Der Gesamtnutzwert nimmt bei einer Steigerung der Entnahme dann aber kontinuierlich bis auf 46% ab.

Bei einer Gesamtentnahme von 1000 l/s ist er mit 56% noch vergleichsweise hoch. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Ergebnissen aus Kapitel 6, in dem durch systematische Variation eine verbesserte Entnahmeverteilung entwickelt wurde (Tab. 6.2), so zeigt sich, dass durch die Anwendung des Optimierungssystems der Gesamtnutzwert um weitere 7% gesteigert werden kann. Theoretisch kann der Gesamtnutzwert zwischen 0 und 100% schwanken. **Aufgrund der hydraulischen Verhältnisse, die sich mit der Entnahme beeinflussen lassen, variiert der Gesamtnutzwert aber nur zwischen 21 und 58%. Andere Gesamtnutzwerte lassen sich mit keiner Entnahme erzielen.**

Analysiert man die Teilnutzwerte der drei Nutzergruppen, so wird klar, woher das deutliche Abfallen des Gesamtnutzwerts bei der Steigerung der Entnahme von 1000 l/s auf 1300 l/s rührt. Es sinken alle Teilnutzwerte. Die größte Differenz weist mit 14% der Naturschutz auf. Zu beachten ist, dass die Landwirtschaft den höchsten Teilnutzwert bei einer Entnahme von 1000 l/s erreicht. Der Teilnutzwert für die Wasserwirtschaft fällt kontinuierlich von 81% auf 69%, ist aber für alle drei Optimierungen der jeweils höchste Teilnutzwert.

Die einzelnen ZEG haben nicht immer die gleiche Tendenz wie die zugehörigen Teilnutzwerte innerhalb des Schwerpunktbereichs. Im Schwerpunktbereich der Wasserwirtschaft beispielsweise steigt der Teilnutzwert „Vermeidung von Auswaschungen aus nitratreichen Deckschichten“ erwartungsgemäß mit zunehmender Gesamtentnahme. Dieser Teilnutzwert kann aber das Absinken des Zielerfüllungsgrads für die „Minimierung der Nitratkonzentration im Mischwasser“ bei steigender Entnahme von 100% auf 17% nicht kompensieren, und da die verbleibenden Teilnutzwerte relativ konstant bleiben, sinkt der Teilnutzwert für die Wasserwirtschaft ab. Der Zielerfüllungsgrad für die „Minimierung der Kosten“ hat keinen eindeutigen Trend.

Innerhalb des Schwerpunktbereichs der Landwirtschaft ist der Trend ebenfalls nicht eindeutig, die Gruppe „Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 2“ erreicht ihren maximalen Teilnutzwert wie der Schwerpunktbereich bei einer Entnahme von 1000 l/s. Dagegen sinkt der Teilnutzwert der Gruppe „Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 4“ von 52% auf 1% stark ab. Aufgrund der geringen Gewichtung dieser Wertstufe ($g = 0,05$) überträgt sich das Ergebnis jedoch nicht auf den Teilnutzwert für die Landwirtschaft. Die verbleibenden beiden Zielerfüllungsgrade bleiben annähernd konstant.

Im Schwerpunktbereich Naturschutz ist die Tendenz eindeutig. Bei steigender Gesamtentnahme fallen beide Teilnutzwerte ab. Innerhalb der Wertstufe 1 um 11%, bei Wertstufe 2 sogar um 31%.

7.6.4 Sensitivitätsstudie für den Aufbau des Bewertungssystems

Aufgrund der Mitarbeit zahlreicher Fachleute wie Biologen und Wasserwirtschaftler sowie von Naturschutz- und Bauernverbänden bei der Ermittlung der Bewertungsgrößen und Zielfunktionen kann die Datenbasis, die diesem Anwendungsfall zugrunde liegt, als sehr umfangreich angesehen werden. Letztendlich münden alle Erkenntnisse dieser Fachleute in der Entwicklung des hier genutzten Bewertungssystems. Aber nicht bei jedem Untersuchungsraum kann eine solch umfangreiche Grundlage vorausgesetzt werden. Deshalb soll nachfolgend untersucht werden, inwieweit das Bewertungssystem vereinfacht werden kann, um es auch anderen Interessenten nutzbar zu machen. Dazu soll die vorhandene Datengrundlage in drei betrachteten Fällen sukzessive vereinfacht werden. Die Auswirkungen dieser Vereinfachung werden an den Entnahmeverteilungen sowie den Nutzwerten ermittelt, die sich für eine Optimierung bei vorgegebener Gesamtentnahme von 1100 l/s ergeben.

Im ersten Fall wird das komplexe Zielsystem (Tab. 7.1) gemäß Tab. 7.1 vereinfacht. Es erfolgt nun keine differenzierte Gewichtung mehr innerhalb der Schwerpunktbereiche Landwirtschaft und Naturschutz.

Tab. 7.1: Vereinfachtes Zielsystem des Anwendungsfalls.

Zielebenen mit Gewichtungsfaktoren				
1	2	g	3	g
Optimierung des Gebietswasserhaushalts im Wassergewinnungsgebiet Donauried	Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft	0,33	Minimierung der Nitratkonzentration im Mischwasser	0,3
			Minimierung der Gesamthärte im Mischwasser	0,3
			Vermeidung von Ausw. aus nitratreichen Deckschichten	0,2
			Minimierung der Kosten	0,2
	Schwerpunktbereich Landwirtschaft	0,33	Optimierung der Flurabstände	1,0
	Schwerpunktbereich Naturschutz	0,33	Optimierung der Flurabstände	1,0

Im zweiten Fall werden die in Kap. 5.3 dargelegten Zielfunktionen des Anwendungsfalls nach Tab. 7.2 vereinfacht.

Tab. 7.2: Vereinfachte Zielfunktionen des Anwendungsfalls

Schwerpunktbereich	Kriterium	GFA _{min}	GFA _{opt1}	GFA _{opt2}	GFA _{max}
Landwirtschaft	Nutzung: Acker / Bodentyp: Mineralisch	0,6	1,0	-	-
	Nutzung: Acker / Bodentyp: Moor	0,7	1,1	1,2	2,0
	Nutzung: Grünland / Bodentyp: Mineralisch	0,3	0,6	-	-
	Nutzung: Grünland / Bodentyp: Moor	0,4	0,7	1,1	2,0
Naturschutz	Vegetationsstrukturen N1-N10	-0,7	-0,2	0,2	1,2
	Nutzungsformen /-intensitäten U1-U8 / A	0,0	0,2	0,7	1,0
Wasserwirtschaft	Minimierung der Nitratkonzentration*	-	-	22,0	27,0
	Minimierung der Gesamthärte*	-	-	13,5	13,8
	Vermeidung von Auswaschungen	1,0	1,0	-	-
	Minimierung der Gesamtkosten*	-	-	0,05	0,1

* Zielfunktion wie im komplexen Zielsystem

Im Schwerpunktbereich Landwirtschaft erfolgt nun lediglich eine Unterscheidung in zwei Nutzungstypen, Acker und Grünland. Die Zielfunktionen für diese Nutzungstypen sind weiterhin nach dem Bodentyp unterteilt. Diese vier Zielfunktionen sind dann jeweils ein ungefährer Mittelwert der bislang verwendeten zahlreichen komplexen Zielfunktionen. Im Schwerpunktbereich Naturschutz werden zwei Zielfunktionen definiert, eine für die Vegetationsstrukturen und eine für die Nutzungsformen bzw. -intensitäten. Diese sind ebenfalls ungefähre Mittelwerte der jeweiligen komplexen Zielfunktionen dieses Bereichs. Im Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft wird bei der Gruppe Vermeidung von Auswaschungen aus nitratreichen Deckschichten nun lediglich eine Zielfunktion als Mittelwert der bisherigen zwei Zielfunktionen definiert.

Der dritte Fall ist eine Kombination der Fälle eins und zwei, d.h. sowohl das Zielsystem, als auch die Zielfunktionen sind vereinfacht.

Eine Optimierung mit Hilfe der vereinfachten Bewertungssysteme sowie zum Vergleich eine Optimierung mit Hilfe des komplexen Ausgangsfall wurden durchgeführt. Die optimale Entnahmeverteilung kann Tab. 7.3 entnommen werden.

Tab. 7.3: *Entnahmeverteilung für die Optimierung mit Hilfe der drei vereinfachten Bewertungssysteme sowie zum Vergleich mit Hilfe des komplexen Bewertungssystems.*

	Entnahme [l/s]				Fall 1 bis 3 - Vergleich	
	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Vergleich	[l/s]	[%]
	Fassung 1	426	426	426	418	+8
Fassung 2	279	271	241	300	-59	25
Fassung 3	76	72	85	70	+15	20
Fassung 4	67	74	74	64	+10	14
Fassung 5 Kies	23	27	45	20	+25	125
Fassung 5 Karst	100	100	100	100		
Fassung 6	129	129	129	127	+2	2
Gesamt	1100	1099	1100	1099		

Für alle drei Fälle mit vereinfachtem Bewertungssystem erkennt man, dass die generelle Verteilung der vorgegebenen Gesamtentnahme auf die Fassungen erhalten geblieben ist. Im Detail allerdings sind Unterschiede zu finden, die im Hinblick auf die Ergebnisse der instationären Optimierung in Kap. 10 nicht zu unterschätzen sind.

Die Entnahmen für Fall 1 liegen am nächsten am Vergleichsfall, die Vereinfachung des Zielsystems hat lediglich eine Reduktion der Entnahme von rund 20% an Fassung 2 zur Folge. Bei Fall 2 liegen die Entnahmen schon etwas weiter von denen des Vergleichsfalls entfernt. Die Entnahmen an den Fassungen 4 und 5 werden jeweils um ca. 10 l/s gesteigert. Die Entnahme an Fassung 2 wird geringer gewählt als beim Vergleichsfall. Betrachtet man die Entnahmen des Fall 3, werden Schwächen des stark vereinfachten Bewertungssystems deutlich. Die Entnahme an Fassung 2 wird viel zu tief gewählt, die Entnahme an Fassung 5 dafür

mehr als verdoppelt und auch die Entnahme an Fassung 3 wird erhöht. Die Teilnutzwerte für diese Entnahmeverteilungen sind in Tab. 7.4 wiedergegeben.

Tab. 7.4: Nutzwerte für die Optimierung mit Hilfe der drei vereinfachten Bewertungssysteme sowie zum Vergleich mit Hilfe des komplexen Bewertungssystems

Zielebene	Kriterium	Nutzwert [%]			
		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Vergleich
3	Wasserwirtschaft: Minimierung der Nitratkonz. im Mischwasser	55	56	52	56
	Wasserwirtschaft: Minimierung der Gesamthärte im Mischwasser	100	100	100	100
	Wasserwirtschaft: Vermeid. v. Ausw. aus nitratr. Deckschichten	66	73	70	68
	Wasserwirtschaft: Minimierung der Kosten	66	52	53	72
	Landwirtschaft: Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 1	65,4	71	68,2	71
	Landwirtschaft: Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 2		62		52
	Landwirtschaft: Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 3		47		37
	Landwirtschaft: Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 4		62		28
	Naturschutz: Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 1	41,8	56	45,8	51
Naturschutz: Optimierung der Flurabstände innerhalb Wertstufe 2	26		21		
2	Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft	72,7	71,8	70,3	74,7
	Schwerpunktbereich Landwirtschaft	65,4	64,4	68,2	57,8
	Schwerpunktbereich Naturschutz	41,8	44,3	45,8	39,1
1	Gesamtnutzwert	55,8	56,9	58,3	52,7

Generell kann man sagen, dass die vereinfachten Bewertungssysteme den Gesamtnutzwert überschätzen. Je weiter das Bewertungssystem vereinfacht wird, desto höher ist der Gesamtnutzwert. Diese Überschätzung resultiert insbesondere aus dem deutlich höher bewerteten Schwerpunktbereich Landwirtschaft, aber auch aus der höheren Bewertung des Schwerpunktbereichs Naturschutz. Dies ist insofern bedenklich, als dass der Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft in allen drei Fällen niedriger bewertet wird und somit die Differenz der Teilnutzwerte der Schwerpunktbereiche kleiner wird. Dies wiederum erhöht wegen der Verwendung von Composite Programming den Gesamtnutzwert und führt letztendlich dazu, dass die beiden Schwerpunktbereiche Landwirtschaft und Naturschutz nicht mehr mit der gleichen Intensität optimiert werden wie im komplexen Vergleichsfall.

Die durchgeführten Vereinfachungen lassen sich sicherlich nicht nur schwer verallgemeinern. Aber dennoch zeigt die Untersuchung, dass bei einer Bewertung und Optimierung jeweils dasselbe Bewertungssystem zugrunde gelegt werden sollte. Wird das Bewertungssystem geändert, so sind die Ergebnisse nicht mehr miteinander vergleichbar.

7.7 Zusammenfassung

Das Optimierungssystem für stationäre Verhältnisse wurde auf das Donauried bei mittleren hydrologischen Verhältnissen angewendet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass eine Grundwasserentnahme aus den 6 Fassungen im Kiesaquifer und zuzüglich eine Entnahme aus dem Karstgrundwasserleiter an der Fassung 5 erfolgt. Die Entnahme aus dem Karstaquifer wurde nicht in die Optimierung einbezogen. Hier wurde bei allen Optimierungsbetrachtungen eine Entnahme von 100 l/s angesetzt.

Erfolgt eine Optimierung der Grundwasserentnahme aus den Fassungen des Kiesaquifers im Donauried ohne eine festgelegte Gesamtentnahme, so beträgt die optimale Gesamtwasserentnahme unter den definierten Randbedingungen 661 l/s aus dem Kiesaquifer zuzüglich 100 l/s aus dem Karstaquifer bei Fassung 5. Optimale Verhältnisse im Donauried werden nur dann erreicht, wenn auch eine Entnahme stattfindet. Im Vergleich zur mittleren Entnahme der letzten 11 Jahre, die im Mittel 940 l/s beträgt, liegt die optimale Entnahme um ca. 19% geringer als die tatsächliche mittlere Entnahme. Deutlich größere Unterschiede ergeben sich aber, wenn die mittleren Entnahmen der einzelnen Fassungen mit den optimalen Entnahmen an den einzelnen Fassungen betrachtet werden. Danach müssten die Entnahmen an den Fassungen 3 und 5 deutlich reduziert werden und auf die Fassungen 1, 2, 4 und 6 aufgeteilt werden. Der Gesamtnutzwert einer sogenannten freien Optimierung liegt bei 58,24%. Ein höherer Gesamtnutzwert ist nicht möglich. Den größten Teilnutzwert erhält der Schwerpunktbereich Wasserwirtschaft gefolgt von der Landwirtschaft und dann dem Naturschutz weil:

- mit einer Entnahme die Nutzwerte der Flächen in der Nähe der Fassungen am besten beeinflusst werden,
- sich die Bewertung von landwirtschaftlichen Flächen bei einer gesteigerten Entnahme verbessert und
- der Teilnutzwert des Naturschutzes sehr stark von den natürlichen Verhältnissen abhängt und eine Entnahme in den meisten Fällen zu einer Verschlechterung des Teilnutzwertes des Naturschutzes führt.

Werden Optimierungsbetrachtungen mit vorgegebenen Gesamtentnahmen von 700 l/s, 1000 l/s und 1300 l/s durchgeführt, so ergeben sich Gesamtnutzwerte, die kleiner sind als bei einer freien Optimierung. Während die Gesamtnutzwerte bei den Gesamtentnahmen von 700 und 1000 l/s noch in der Größenordnung von dem der freien Optimierung liegen, fällt der Gesamtnutzwert bei einer Entnahme von 1300 l/s mit 46,30% deutlich gegenüber den übrigen Betrachtungen ab.

Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen für das Donauried zeigen deutlich, dass die Grundwasserentnahmen noch weiter optimiert werden können. Im Vergleich zu den Gesamtnutzwerten bei systematischer Variation der Grundwasserentnahmen gemäß Kapitel 6 lässt sich bei Anwendung des Optimierungssystems noch eine deutliche Steigerung der Gesamtnutzwerte feststellen.

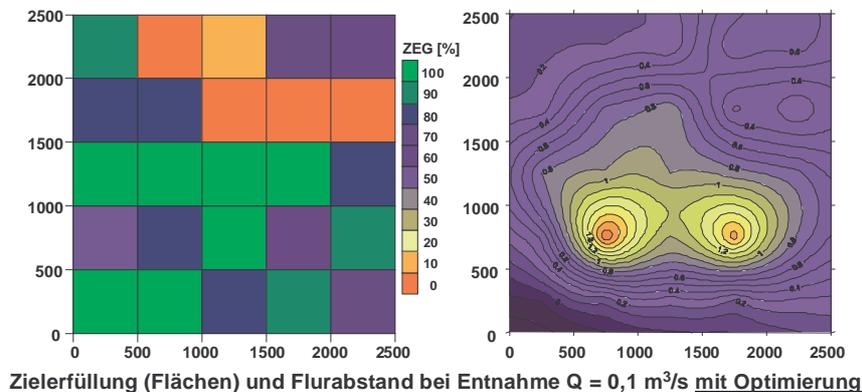
Wird die Steigerung der Entnahme von 700 auf 1300 l/s im Hinblick auf die Verteilung der Entnahmen auf die einzelnen Fassungen analysiert, so zeigt sich, dass bis 1000 l/s die zusätzliche Entnahme an den Fassungen 1 bis 6 erfolgen sollte. Da dies bei Entnahmen von 1000 l/s nicht vollständig ausreicht, muss auch an der Fassung 2 mehr Wasser entnommen werden. Bei einer Entnahmesteigerung von 1000 l/s auf 1300 l/s muss dieses zusätzliche Wasser an den Fassungen 2 und 3 entnommen werden, wobei die Entnahme an der Fassung 3 mehr gesteigert werden sollte als an der Fassung 2. Die Optimierungen bestätigen grundsätzlich die bereits in Kap. 6 gewonnenen Erkenntnisse. Allein die Fassung 4 schneidet im Zusammenspiel mit den anderen Fassungen anders ab als erwartet.

Im Rahmen der Optimierung für stationäre Verhältnisse der Grundwasserentnahmen im Donauried wurde auch eine Sensitivitätsstudie für die Komplexität des Bewertungssystems durchgeführt. Dabei wurde das Bewertungssystem in drei Schritten vereinfacht. Werden die Schwerpunktbereiche für Landwirtschaft und Naturschutz in ihren Wertstufen nicht weiter unterteilt, ist das Optimierungsergebnis vergleichsweise nahe an dem komplexen Bewertungssystem. Eine Vereinfachung der Zielfunktionen führt dagegen zu einer etwas anderen optimalen Entnahmeverteilung als das komplexe System. Deutlichere Unterschiede ergeben sich in der Bewertung der Optimierungsergebnisse. Mit zunehmender Vereinfachung steigt der Gesamtnutzwert. Dies wird vordringlich durch einen Anstieg der Teilnutzwerte der Schwerpunktbereiche für Landwirtschaft und Naturschutz verursacht. Die Bewertung dieser Nutzungsgruppen wurde im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchung vorwiegend vereinfacht. Der Teilnutzwert des Schwerpunktbereiches Wasserwirtschaft sinkt bei Vereinfachung des Bewertungssystems. Dies betrifft insbesondere den Teilnutzwert für die Kosten.

Die unterschiedlichen Ergebnisse bei der Bewertung lassen den Schluss zu, dass eine Bewertung nur dann abgesicherte Aussagen liefert, wenn dasselbe Bewertungssystem angewendet wird. Der Gesamtnutzwert und die Teilnutzwerte geben nur im Vergleich mit anderen Entnahmevarianten Auskunft über eine Veränderung der Nutzwerte.

Berechnungsbeispiel IV/IV (Fortsetzung von S. 145)**Optimierung für $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$**

Des Weiteren wurde die Entnahmeverteilung für $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ mit dem Optimierungsalgorithmus SOLVER optimiert. Das Optimum ergibt sich für $Q_1 = 0,061 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2 = 0,034 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_3 = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ mit einem Gesamtnutzwert von 72,4 % ($I_N = 82,7 \%$, $I_L = 63,7 \%$, $I_W = 74,3 \%$).

**Bestimmung der optimalen Entnahme („freie Optimierung“)**

Während im vorigen Beispiel für eine vorgegebene Gesamtentnahme die Entnahmeverteilung auf die einzelnen Brunnen optimiert wurde, wurden in einer weiteren Variante die optimale Gesamtentnahme und die optimale Entnahmeverteilung bestimmt. Demnach ergibt sich die optimale Bewirtschaftungsstrategie bei einer Gesamtentnahme von $Q = 0,144 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_1 = 0,066 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2 = 0,020 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3 = 0,058 \text{ m}^3/\text{s}$). Der Gesamtnutzwert beträgt in diesem Fall 74,6% ($I_N = 70,2\%$, $I_L = 75,9\%$, $I_W = 78,5\%$) (Bild 8e). Alle drei Nutzer erhalten dabei gleichmäßig hohe Teilbewertungen.

