

## 4.6 Validieren

Durch die Kalibrierung wurden die Parameter im Rahmen einer sinnvollen Schwankungsbreite so festgelegt, daß sich für den gewählten mittleren Förderzustand (Mai 1996) der Wasserwerke die beste Modellanpassung für den stationären Zustand ergibt. Da das Modell für die Simulation von Szenarien zukünftiger Förderzustände und Schwankungen natürlicher Randbedingungen vorgesehen ist, besteht die Aufgabe der Modell-Validierung darin, die Gültigkeit der Festlegungen unter anderen Bedingungen, in diesem Fall anderen Förderzuständen (Beobachtungszeiträumen), zu testen. Nach KINZELBACH & RAUSCH (1995) kann ein Modell, „als in seiner Richtigkeit bestärkt (oder validiert) angesehen werden, wenn mehrere zusätzliche Beobachtungszeiträume (mit möglichst unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen) rechnerisch realitätsnah nachvollzogen werden können, ohne daß eine Modifizierung der nicht zeitabhängigen Parameter erforderlich ist“. Diese Ansicht unterstützt u.a. auch REFSGAARD (2001).

Ob man diesen Vorgang nun Modell-„Validierung“ nennt, und ob ein Modell überhaupt „validierbar“ ist, wird in der Fachwelt seit Jahren diskutiert (ANDERSON & BATES 2001). Dabei muß zuerst unterschieden werden zwischen dem „Modell“ als Software Programm („model code“) und der Modellanwendung („model“) zur Lösung eines speziellen Problems mittels eines Programms. Fest steht, daß ein Modellsystem oder „model code“ (hier FEFLOW) prinzipiell nie „validierbar“ sondern nur „verifizierbar“ ist (REFSGAARD & STORM 1996, REFSGAARD 2001).

Bei der Aussage, daß ein Modell im Wortsinn nicht „validiert“ werden kann gehen die Meinungen weit auseinander. So sollte nach KONIKOW & BREDEHOEFT (1992) und ORESKES & BELITZ (2001) für den Term „Validierung“ (validation) besser ein diesen Vorgang zutreffender beschreibenden Begriff wie „model testing, model evaluation, model calibration, sensitivity testing, benchmarking, history matching, and parameter estimation“ verwendet werden. Nach Meinung von ORESKES & BELITZ (2001) können Modelle überhaupt nicht validiert (in diesem Wortsinn) werden. HASSAN (2004) möchte die praktische Anwendung der Validierung als Prozeß und nicht als Resultat sehen und zeigt dies an einer Feldstudie. In HASSAN (2003) wird die Diskussion um die „Validierung“ zusammengeführt. Es wird festgestellt, daß die Debatte meist nur um die Terminologie und nicht um den Prozeß an sich geführt wird. So muß eine Einigung darüber erfolgen, welche genaue Bedeutung (Definition) bzw. Vorgehensweise sich mit dem Begriff verbindet. Niemand dagegen zweifelt die Notwendigkeit an, ein Modell an unterschiedlichen voneinander unabhängigen hydrologischen Zuständen zu testen, bevor es zur Untersuchung unbekannter Zustände (Prognosen, Szenarienrechnung) oder auch zur Verifizierung der automatischen Kalibrierung (SONNENBORG et al. 2002) genutzt wird. Das Vorgehen ist immer in Abhängigkeit vom Zweck der Modellierung neu zu definieren.

Dagegen finden sich diese Überlegungen bei der praktischen Modellanwendung zur Simulation der GW-Strömung im allgemeinen noch nicht wieder, wie an folgenden Beispielen gezeigt wird. Wenn ein Modell nicht nur zum Nachvollziehen eines Ist-Zustandes (zurückliegender Zeitraum), sondern auch zur Rechnung von Prognosen bzw. Szenarien zukünftiger bzw. unbekannter Zustände genutzt wird, erfolgt auch eine „Validierung“ unter Verwendung von anderen bekannten hydrologischen Zuständen; immer vorausgesetzt, diese Daten liegen auch vor. So konnten MARTIN & FRIND (1998) nur eine Kalibrierung zum Test ihres komplexen GW-Modells

durchführen, da zur Validierung notwendige Daten nicht erfaßt wurden. Dieses Problem der fehlenden Vergleichsdaten hatten auch UDOH (1994) bei der Modellierung der Grundwasserströmung im Sokoto-Becken bzw. POPPEI et al. (2000) bei Untersuchungen zum Grund- und Oberflächenwasserhaushalt in Rostock-Warnemünde. HAUGH (2002) begnügte sich mit der Kalibrierung sowie einer Sensitivitätsanalyse der Durchlässigkeitsparameter und Entnahmen, um unterschiedliche Förderszenarien und den Einfluß von Trockenheit in einem Einzugsgebiet zu simulieren. Diese Vorgehensweise wählten auch GONZALES-HERRERA et al. (2002) zur Beschreibung der GW-Strömungsverhältnisse im Yucatan Karst Aquifer. Das Modell wurde nicht validiert, da wie auch bei THOM (1997) nur der Ist-Zustand interessierte. MCADA & BARROLL (2002) simulierten die GW-Strömungsverhältnisse im Mittleren Rio Grande Becken im Zeitraum 1900-2000. Für diese instationäre Simulation eines zurückliegenden Zeitraumes war die Kalibrierung des Modells anhand einiger Zeitabschnitte zu denen Meßwerte vorlagen ausreichend. MORGENSTERN (1997) modelliert das Grundwassersystems der Kehlheimer Schüssel und führt eine Validierung als Voraussetzung zur Szenarienrechnung (Strömung und Transportmodellierung) durch. STAMOS et al. (2001) kalibrierten ihr GW-Strömungsmodell vom Mojave River Becken für den Zeitraum 1931-1994. Im Anschluß führten sie eine Validierung mit den Daten von 1995-1999 durch, um mit diesem Modell wasserwirtschaftliche Managementstrategien simulieren zu können. Diese wurden in das Szenario einer längern Trockenperiode eingebettet. Dieses Vorhaben ähnelt in seiner Zielstellung und Komplexität der vorliegenden Arbeit. Im Modellaufbau wurden Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und eben auch eine Validierung durchgeführt und plausibel begründet.

Für das vorliegende Modell erfolgte die Validierung nach der eingangs zitierten Definition von KINZELBACH & RAUSCH (1995), indem stationäre Zustände aus dem Zeitraum 1989-99 als Vergleich zum kalibrierten Modell gerechnet wurden. Weiterhin wurde ein Jahrgang mit wechselnder Fördermenge im Zeitraum 01/96-12/96 gerechnet und zum instationären Verifizieren (WASY 2004) des Modells genutzt.

Als stationäre Vergleichszustände boten sich die Extreme mit wesentlich höherer Fördermenge (Mai 1989) und stark verändertem Förderregime (Mai 1999) sowie Zustände leichter Veränderungen (Mai 1995, Oktober 1996) an. Für 1996 konnten zudem die Ergebnisse der stationären mit denen der instationären Simulation verglichen werden.

Zur Vorbereitung auf die Simulation von Szenarien wurden zusätzlich noch die Extremförderzustände (Mai 1989, Mai 1999) mit Variation der Randbedingungen Transfer (RB 3. Art) und Randzustrom (RB 1. Art, nur Mai 1999) gerechnet. Aus den Veränderungen der simulierten gegenüber den gemessenen Wasserständen kann die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Variation dieser Randbedingungen abgeleitet werden. Vom Förderzustand Mai 1999 wurden dann die Szenarien abgeleitet.

#### **4.6.1 Stationäre Zustände**

Insgesamt wurden sechs verschiedene Förderzustände der Wasserwerke simuliert und die Ergebnisse mit dem kalibrierten Zustand verglichen. Die Modellanpassung wurde hauptsächlich mit dem mathematischen Kriterium (MQA) verfolgt und die Ergebnisse in Tabelle 4.6-01 dargestellt. Daneben lagen zum Vergleich auch Isolinienpläne von Stichtagsmessungen der Wasserwerke vor. Die Förderung der Wasserwerke im Mai 1995 und Oktober 1996 weicht nicht wesentlich vom kalibrierten Zustand Mai 1996 ab (Abb. 4.5-01). Daher ist die Modellanpassung

für diese drei Zustände auch ähnlich (Tab. 4.6-01). Anders wirken sich die Simulationen der Extremzustände auf die Modellergebnisse aus, die durch hohe Förderung (Mai 1989/Oktober 1989) sowie geringe Förderung und zusätzlich verändertem Förderregime (Mai 1999) gekennzeichnet sind. Auf diese Zustände am Beginn und am Ende des betrachteten Zeitraumes wird im folgenden detaillierter eingegangen.

Tabelle 4.6-01: Vergleich der Modellanpassungen (MQA) der stationären Simulation verschiedener Förderzustände im Zeitraum 1989–1999. Die Modellanpassungen ohne bzw. mit Basis-Leckage (vgl. Werte in Tabelle 4.5-05) werden gegenübergestellt. Für vier von sieben Förderzuständen resultiert aus dem Einsatz der Basis-Leckage eine bessere Modellanpassung. Da die Auswirkungen für jeden Förderzustand unterschiedlich sind, kann eine einheitliche Basis-Leckage nicht validiert werden.

Der kalibrierte Zustand Mai 1996 ist „fett-kursiv“ und die im Text diskutierten Extremzustände „fett“ hervorgehoben.

Förderzustand (s. Anhang)	ohne Basis-Leckage MQA (Nr. Modelllauf)	mit Basis-Leckage MQA (Nr. Modelllauf)	Differenz („ohne“ minus „mit“ Basis-Leckage)
<b>Mai 1989 [100%]</b>	<b>3,8013 (203)</b>	<b>3,9500 (253)</b>	<b>-0,1487</b>
<b>Mai 1989 [60%]</b>	<b>0,9352 (202)</b>	<b>0,9082 (252)</b>	<b>0,0270</b>
Oktober 1989 [60%]	0,9068 (301)	0,4865 (351)	0,4203
Mai 1995	0,2503 (402)	0,2617 (452)	-0,0114
<b>Mai 1996 (kalibriert)</b>	<b>0,2847 (601)</b>	<b>0,2315 (651)</b>	<b>0,0532</b>
Oktober 1996	0,2602 (701)	0,2003 (751)	0,0599
<b>Mai 1999</b>	<b>0,3593 (801)</b>	<b>0,3756 (851)</b>	<b>-0,0163</b>

Beim Vergleich der sechs stationären Förderzustände wurde zudem die Annahme bestätigt, daß das Modell nicht mit einer von den Förderraten unabhängigen Basis-Leckage validiert werden kann. Die unterschiedliche Modellanpassung der verschiedenen Förderzustände unter Nutzung der kalibrierten Basis-Leckage zeigt Tabelle 4.6-01. Daher kann bei der Simulation von Szenarien dieser Anteil an der Gesamtbilanz nicht berücksichtigt werden.

### ***Mai 1989 - extrem hohe Förderung***

Mit der Simulation des Zustandes mit der Förderung Mai 1989 sollte überprüft werden, wie das Modell auf extrem hohe Förderraten reagiert. Laut Angaben der Wasserwerke waren die Entnahmen zu diesem Zeitpunkt um das ca. 2½-fache höher als im Mai 1996 (Tab. 4.6-05). Es förderten zusätzlich noch die WW Friedrichsfelde und Altglienicke (vgl. Abb. 4.5-01).

Die klimatischen Randbedingungen ähneln dem kalibrierten Zustand Mai 1996 (s. Anlage A). Auch dieser Zeitpunkt liegt auf dem Übergang von einem GW-Hoch zu einem GW-Tief, ausgelöst durch eine vorangehende Periode geringer Niederschläge. Die gemessene Höhe im Randzustrom (RB 1. Art) liegt bei 36,90 mNN.

Unter Verwendung der angegebenen Fördermengen der Wasserwerke (Mai 1989 [100%]) im kalibrierten Modell ergibt sich eine Gesamtentnahme von 458.327 m<sup>3</sup>/d (Tab. 4.6-05). Die Auswertung der Modellanpassung ergab bis zu 5 m zu tief simulierte Absenkungen besonders im Bereich der WW Wuhlheide und Johannisthal (Abb. 4.6-01). Aus diesen Abweichungen resultiert die hohe MQA von 3,8013. Modellseitig konnte dieser Fehler nicht erklärt werden, da bereits ein erhöhter Transferfaktor ausreichend Uferfiltration entlang der Gewässer ermöglichen sollte und auch die RB 1. Art den Randzustrom nicht begrenzt. Man kann ebenfalls von der korrekten Messung der GW-Meßstellen ausgehen. Die Zeitreihen liegen ohne Unterbrechung vor und ein Meßfehler in dieser Größenordnung, gleichzeitig an allen betroffenen Meßstellen, ist

nahezu ausgeschlossen. Daher wurde ein Fehler in den verwendeten Förderdaten der Wasserwerke vermutet. Nach Recherchen bei den BWB (2003) wurde diese Vermutung bestätigt. So sollen die Angaben zur Fördermenge der beiden (im damaligen sozialistischen Wettbewerb) konkurrierenden Wasserwerke um bis zu 50% überhöht worden sein. Dies war u.a. darin begründet, daß man die Wassermengen nicht über den Durchfluß ermittelte, sondern über eine Zählung der Pumpenhübe interpolierte. Eine direkte Kontrolle über die gemessenen Wasserstände wurde nicht beauftragt.

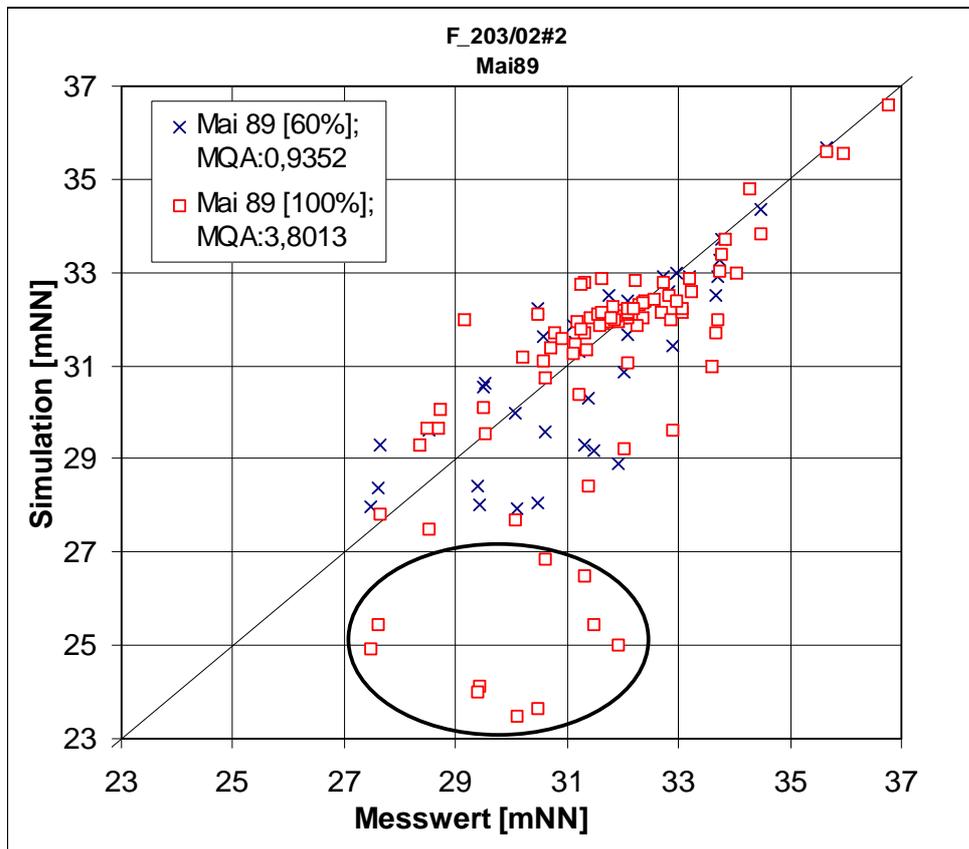


Abbildung 4.6-01: Scattergramm mit dem Vergleich der zwei simulierten Varianten für den Zustand Mai 1989. Gekennzeichnet sind die Kontrollmeßstellen mit den deutlich zu tiefen Absenkungen im Bereich der WW Johannisthal und Wuhlheide bei Anwendung der original Förderdaten (Mai 1989 [100%]). Diese extremen Abweichungen wurden durch reduzieren der Fördermenge auf 60% korrigiert (Mai 1989 [60%]).

Bei der Simulation wurden daher für die Teltowgalerie (WW JOH) und das gesamte WW Wuhlheide die verwendete Fördermenge auf 60% („Mai 1989 [60%]“) der Originaldaten reduziert.

Im Modell geht damit die GW-Entnahme auf  $399.968 \text{ m}^3/\text{d}$  zurück. Durch den Einsatz dieser fiktiven Zahlen verringern sich die Abweichungen im Bereich WW Johannisthal bis auf maximal 100 cm und im Bereich WW Wuhlheide auf maximal 200 cm (Abb. 4.6-01). Die Modellanpassung, gemessen an der MQA, verbessert sich auf einen Wert von 0,9352!

Weitere Abweichungen von maximal 100 cm lagen entlang der Galerien A-D des WW Friedrichshagen vor. Es konnte nicht geklärt werden, ob dies ebenfalls ein Resultat der unsicheren Datenlage ist. Wahrscheinlicher sind aber die Ursachen, mit denen auch die Abweichung der Simulation des Zustandes Mai 1999, begründet wurden. Dies wird im nächsten

Abschnitt diskutiert, da die Förderung der Galerien in beiden Zuständen ähnlich hoch ist und die Auswirkung somit vergleichbar sind.

Die simulierten Anteile der einzelnen Brunnengalerien an der Förderung und der Uferfiltratnutzung für die beiden o.g. Zustände können der Tabelle 4.6-05 entnommen werden. Besonders erwähnenswert sind die absoluten Anteile der Uferfiltration im Vergleich zum Mai 1996. Allein der Anteil der Uferfiltration im Mai 1989 von ca. 250.000 m<sup>3</sup>/d ist etwas größer als die Gesamtentnahme im Mai 1996 (und auch Mai 1999)! Prozentual beträgt der Unterschied nur etwa 15%. Außerdem läßt sich die gegenseitige Beeinflussung der benachbarten Einzugsgebiete der WW Wuhlheide und Friedrichshagen ableiten. Für den Zustand Mai 1989 [100%] wird für die Nordgalerien (B-D, WW FDH) ein Uferfiltratanteil von 71% simuliert. Bei Verringerung der Förderleistung des WW Wuhlheide auf 60%, vermindert sich dort, aber auch an den Nordgalerien (65%), der Uferfiltratanteil. Dies ist mit der anteiligen Vergrößerung des Einzugsgebietes in Richtung Einzug WW Wuhlheide zu begründen. Diese Zusammenhänge werden ausführlich im Kapitel 5.0 („Szenarien“) diskutiert.

### ***Mai 1999 - geringe Förderung und veränderte Förderschwerpunkte***

Mit der Simulation des Zustandes mit der Förderung Mai 1999 sollte überprüft werden, wie das Modell auf die Veränderungen durch Stilllegung von Brunnengalerien reagiert. Laut Angaben der Wasserwerke wurden die Südgalerien (G-M) des WW Friedrichshagen und die Teltowgalerie (WW JOH) im Vergleich zum Mai 1996 geschlossen (Tab. 4.6-05). Mit den übrigen Brunnengalerien wurde aber eine ähnliche GW-Entnahme wie Mai 1996 erzielt (vgl. Abb. 4.5-01), wobei besonders die Galerien C und F des WW Friedrichshagen die Förderung erhöhten.

Die klimatischen Randbedingungen ähneln auch dem kalibrierten Zustand Mai 1996 (vgl. Anlage A). Dieser Zeitpunkt liegt auf dem Übergang von einem GW-Hoch zu einem GW-Tief, ausgelöst durch eine vorangehende Periode geringer Niederschläge. Die Veränderungen waren nicht so gravierend, wie zu den Zeitpunkten Mai 1996 bzw. 1989. Die gemessene Höhe im Randzustrom (RB 1. Art) liegt bei 37,25 mNN.

Unter Verwendung der angegebenen Fördermengen der Wasserwerke (Mai 1999) im kalibrierten Modell, ergibt sich eine Gesamtentnahme von 209.432 m<sup>3</sup>/d (Tab. 4.6-05). Die Auswertung der Modellanpassung ergab zu gering simulierte Absenkungen (maximal 100-200 cm) im Bereich der Galerien B/C und F des WW Friedrichshagen (Abb. 4.6-02). Aus diesen Abweichungen resultiert die gegenüber Mai 1996 erhöhte MQA von 0,3593.

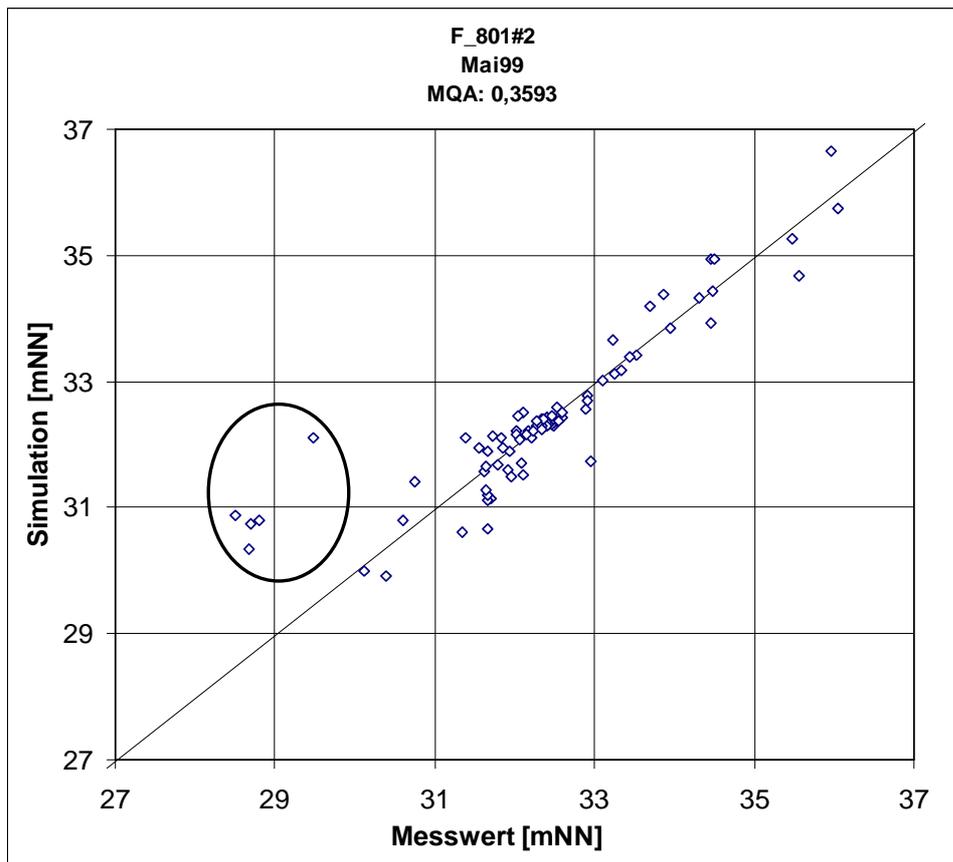


Abbildung 4.6-02: Scattergramm für den Zustand Mai 1999. Gekennzeichnet sind die Kontrollmeßstellen mit der deutlich zu hohen Simulation im Bereich der Galerien B, C und F des WW Friedrichshagen.

Der Fehler im Bereich der Galerie F wurde im Kapitel 4.5.5.1 (Fehlerdiskussion) bereits ausgewertet. Die im Vergleich zum Mai 1996 veränderten Förderschwerpunkte bewirken wesentliche Veränderungen der Bilanzanteile hinsichtlich der Uferfiltration (Tab. 4.6-05). Durch den Wegfall der Teltowgalerie verringert sich der Uferfiltratanteil an der Gesamtförderung des WW Johannisthal. Die Galerie C des WW Friedrichshagen verdreifacht im Vergleich zum Mai 1996 ihre Fördermenge, während Galerie B die Entnahme halbiert und beide nun ähnlich viel fördern. Durch die geringere Entfernung der Galerie C zum Müggelsee wird aber dadurch der Uferfiltratanteil entlang dieser Galerien stark erhöht (Mai 1996: 43%, Mai 1999: 56%).

Diese beiden Galerien sind ein gutes Beispiel für die komplizierten Wechselwirkungen zwischen nahe beieinander liegenden Brunnengalerien. Je nach Kombination der Galerieanteile an der Förderung im gemeinsamen Einzugsgebiet und der gemeinsamen Absenkung variieren die Anteile jeder Galerie an der Uferfiltration und dem landseitigen Zustrom zwischen 0 und 100%. Diese kleinräumigen Wechselwirkungen sind in einem regionalen GW-Strömungsmodell nicht im Detail nachvollziehbar. Die o.g. Abweichung in der Simulation resultiert hauptsächlich aus der Verwendung des einheitlich hohen Transferfaktors. Dieser ermöglicht bei hoher Förderung der Müggelsee parallel verlaufenden Galerie C auch die Simulation eines hohen Uferfiltratanteiles und damit einer geringeren Absenkung. Zusätzlich wirken sich auch hier die geringe Auflösung der geologischen Strukturen (vgl. Kap. 4.5.4.1) und Fehler aus der Modellannahme (Punkt 3) aus.

## 4.6.2 Modellsensitivität

### 4.6.2.1 Transfer

Im Ergebnis der Kalibrierung (Kap. 4.5.5 Zusammenfassung) wurde bereits gezeigt, daß der Einsatz unterschiedlicher Transferfaktoren zu unterschiedlichen Modellanpassungen führt, d.h. das Modell sensitiv gegenüber dieser Randbedingung ist. Weiterhin wurde geschlußfolgert, daß die abschnittsweise Anpassung der Transferfaktoren bei der Kalibrierung eine bessere Modellanpassung ergibt (Tab. 4.5-04), diese aber nicht auf andere Förderzustände übertragbar ist. Dies ist in der veränderten Geometrie der Absenkung bei veränderter Fördermenge begründet. Der Vergleich der stationären Förderzustände (Tab. 4.6-02) im Rahmen der Validierung bestätigt nun, daß die Randbedingung Transfer nur als einheitlicher Wert validiert werden kann.

Tabelle 4.6-02: Vergleich der Modellanpassung (MQA) bei Variation der Transferfaktoren ( $0,5 \cdot d^{-1}$  ist kalibrierter Zustand und fett dargestellt). Die extremen Förderzustände Mai 1989 [60%] und Mai 1999 reagieren auf die Anwendung der einheitlichen Faktoren wie der kalibrierte Zustand. Die Simulation mit den Verteilungen A bzw. B führt beim Förderzustand Mai 1989 [60%] zu einer geringeren Modellanpassung, als die Verwendung des Faktors  $0,5 \cdot d^{-1}$ . Beim Förderzustand Mai 1999 ergibt sich dadurch eine leichte Verbesserung im Modellergebnis.

Transfer [*d <sup>-1</sup> ]	Nr. des Modell- laufes	MQA [Mai 1996]	Anpassung	Nr. des Modell- laufes	MQA [Mai 1989 60%]	Anpassung	Nr. des Modell- laufes	MQA [Mai 1999]	Anpassung
0,1	<b>617</b>	<b>0,2648</b>	↗	204	0,9206	↗	830	0,2788	↑
<b>0,5</b>	<b>601</b>	<b>0,2847</b>	○	<b>202</b>	<b>0,9352</b>	○	<b>801</b>	<b>0,3593</b>	○
1,0	<b>618</b>	<b>0,2920</b>	↘	205	0,9734	↘	831	0,3856	↘
Verteilung A	<b>615</b>	<b>0,2294</b>	↑	207	1,5126	↓	833	0,3443	↗
Verteilung B	<b>616</b>	<b>0,2237</b>	↑	206	1,4936	↓	832	0,3277	↗

Bemerkung: ○: Vergleichswert | ↑: viel besser | ↗: etwas besser | ↘: etwas schlechter | ↓: viel schlechter

### 4.6.2.2 Randzustrom

Durch die Simulation unterschiedlicher Höhen im Randzustrom (RB 1. Art) für den Förderzustand Mai 1999 (Tab. 4.6-03) wurde die beste Modellanpassung für die Höhe von 37 mNN erreicht. Dies bestätigte die Festlegung dieser Randbedingung im Verlauf der Kalibrierung und zeigt gleichzeitig die Sensitivität des Modells gegenüber Änderungen dieser Randbedingung.

Tabelle 4.6-03: Variation in der Höhe des Randzustromes in Meterschritten von 34 bis 38 mNN für den Förderzustand Mai 1999. Die beste Modellanpassung wird für den Wert von 37 mNN (fett dargestellt) erreicht und bestätigt die Festlegung dieser Randbedingung im Verlauf der Kalibrierung.

Höhe Randzustrom [mNN]	MQA (Modellanpassung)	Nr. des Modellaufes
34	0,8961	809
35	0,5831	810
36	0,4035	811
<b>37</b>	<b>0,3593</b>	<b>801</b>
38	0,4521	812

Zusammenfassend konnte für die stationäre Modellanwendung gezeigt werden, daß die für die Simulation des Förderzustandes Mai 1996 kalibrierten Parameter und Randbedingungen auch bei Verwendung grundsätzlich anderer Förderzustände zu einer guten Modellanpassung führen. Das Modell zeigte sich auch sensitiv gegenüber Veränderungen der Randbedingungen Transfer und Randzustrom. Dabei konnte gleichzeitig gezeigt werden, daß die zur Kalibrierung verwendeten Mittelwerte dieser Randbedingungen die beste Anpassung darstellen.

### 4.6.3 Instationäre Zustände

Um den Erfolg der Kalibrierung des stationären Förderzustandes Mai 1996 zu testen, wurde zusätzlich der Jahresgang 1996 zur instationären Verifizierung gerechnet. Im Unterschied zum stationären Zustand, wurde die monatlich wechselnde Förderung in 365 Tagesschritten simuliert. Die anderen Randbedingungen blieben unverändert. Als Anfangsbedingungen kam der im Ergebnis der Kalibrierung simulierte Wasserstand und als Speicherkoeffizient 0,2 (vgl. Kap.4.5.2) zum Einsatz. Die Datenausgabe über die Kontrollmeßstellen erfolgte jeweils in der Monatsmitte, so daß Fehler am Monatsende durch den Wechsel der verwendeten Fördermenge vermieden wurden. Dadurch war ein Vergleich dieser Zeitschritte mit den Tageswerten ausgegebenen Bilanzen und den Wasserständen der stationären Zustände möglich. Vergleicht man die Modellanpassung (MQA) der stationären Simulation der Monate Mai und Oktober mit den instationären Ergebnissen nach 136 Tagen bzw. 289 Tagen (Tab. 4.6-04), zeigten sich für die Tagesschritte des Jahresganges bessere Ergebnisse. Die Werte sind vergleichbar, da auch die Bilanzanteile nahezu identisch simuliert wurden.

Tabelle 4.6-04: Vergleich der Modellanpassung (MQA) und der Bilanzen zwischen der stationären und instationären Simulation der Förderzustände Mai 1996 und Oktober 1996.

Simulation im Vergleich	Nr. des Modelllaufes	MQA (Modellanpassung)	GW-Neubildung [m <sup>3</sup> /d]	Förderung (FM) [m <sup>3</sup> /d]	Rand-Zustrom [m <sup>3</sup> /d]	Uferfiltrat [m <sup>3</sup> /d]	Anteil Uferfiltrat an FM [%]
<b>Mai 1996 stationär</b>	601	<b>0,2847</b>	101.285	213.488	79.170	93.878	43,97
<b>Mai 1996 instationär</b>	1006 (136.Tag)	<b>0,2678</b>	101.285	213.488	80.761	97.000	45,43
<b>Oktober 1996 stationär</b>	701	<b>0,2602</b>	101.285	209.988	81.933	93.112	44,34
<b>Oktober 1996 instationär</b>	1006 (289.Tag)	<b>0,2328</b>	101.285	209.988	80.838	96.589	45,99

In Abbildung 4.6-03 wurde der Jahresgang der Meßwerte und der simulierten Wasserstände ausgewählter Kontrollmeßstellen graphisch dargestellt. Jede Brunnengalerie ist mit einer repräsentativen Meßstelle vertreten. Die Problembereiche sind identisch mit dem stationären Modell und wurden in der Fehlerdiskussion im Kapitel Kalibrieren und in diesem Kapitel (Mai 1999) erörtert. Mit Ausnahme der Galerien B/C des WW Friedrichshagen wird der Jahresgang gut nachgebildet.

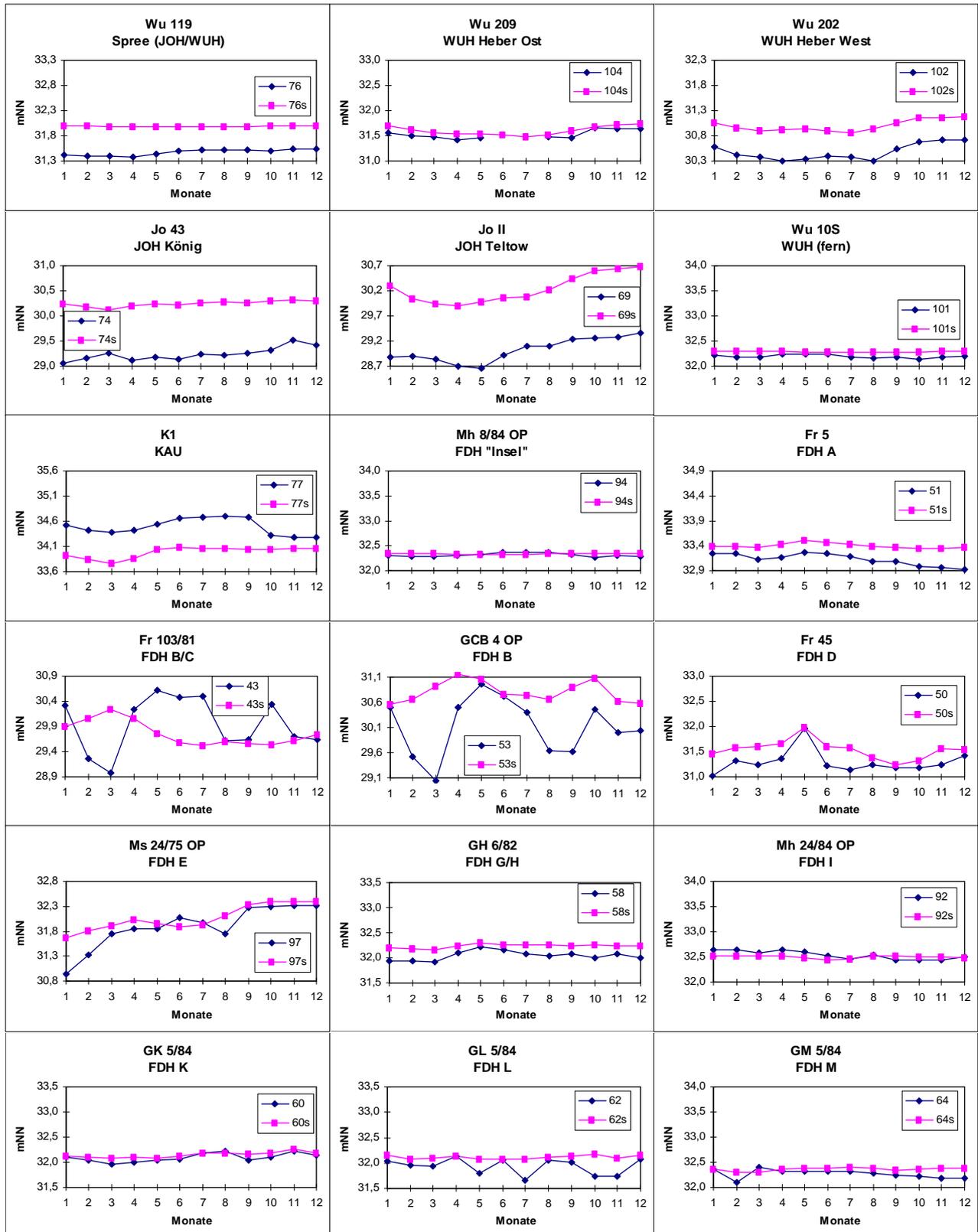


Abbildung 4.6-03: Jahresgang ausgewählter Kontrollmeßstellen für die instationäre Simulation der monatlich wechselnden Fördermenge im Zeitraum 01/96-12/96. Jede Meßstelle repräsentiert eine Brunnengalerie. In der Legende sind die simulierten Werte als pinkfarbene Linie neben den Meßwerten (blaue Linie) dargestellt und mit einem „s“ gekennzeichnet. Auf der y-Achse sind immer 200 cm Differenz aufgetragen. Die Galerien mit den extremen Abweichungen sind wie im stationären Modell im Bereich der WW Johannisthal und Friedrichshagen (Galerie B/C) zu finden. Die Fehler wurden im Kapitel „Kalibrieren“ diskutiert.

### **Ergebnisse**

Die zur Validierung durchgeführten stationären und instationären Simulationen bestätigten die im Ergebnis der Kalibrierung festgestellten Modellgenauigkeiten, Fehlergruppen und Problembereiche. Der Schwerpunkt lag auf dem Vergleich der Modellanpassungen des kalibrierten stationären Zustandes (Mai 1996) mit dem Ergebnis der Simulation völlig anderer Förderzustände (Mai 1989 und Mai 1999). Bei Verwendung der Förderzustände Mai 1996 und Mai 1999 wurde eine vergleichbare Modellanpassung erreicht (Abb. 4.6-04). Die Ergebnisse für Mai 1989 wichen davon deutlich ab (Abb. 4.6-04), was aber zum größten Teil mit unsicheren Förderdaten für den Zustand Mai 1989 begründet werden konnte. In Anbetracht dessen wurde auch für diesen Förderzustand eine mit dem kalibrierten Zustand vergleichbare Modellanpassung angenommen.

Die instationäre Simulation eines Jahresganges der Förderung der Wasserwerke wurde zur erfolgreichen Verifizierung der Annahmen des stationären Modells genutzt.

Zusätzlich konnte an dem Bereich der Galerien B/C des WW Friedrichshagen gezeigt werden, daß die hier genutzte Auflösung des hydrogeologischen Modells keine Detailbetrachtungen einzelner Brunnengalerien zulassen. Ebenso wurde gezeigt, daß die abschnittsweise Anpassung der Transferfaktoren nur jeweils für einen Förderzustand gültig ist und somit nicht für unterschiedliche Förderzustände validiert werden kann. Die daraus resultierenden Fehler sind also in den Modellannahmen begründet und sollten sich nicht negativ auf die Ergebnisse der Validierung auswirken.

Die erfolgreiche Kalibrierung und Validierung zeigen als wesentliches Ergebnis, daß das Modellkonzept mit der speziell für diese Modellgröße gewählten Auflösung der geologischen Daten, der inhomogenen Datenlage und aller getroffenen Vereinfachungen erfolgreich umgesetzt wurde. Nur unter diesen Voraussetzungen war eine Modellierung der GW-Strömung in dem flächenmäßig großen Gebiet überhaupt durchführbar. Mit diesem Konzept ist es somit möglich, regionale Zusammenhänge der Grundwasserdynamik zu modellieren, ohne daß eine hohe Netzdiskretisierung und eine Überladung des Modells mit detaillierten geologischen Informationen die Modellperformance beeinträchtigen. Rechenzeiten von weniger als einer halben Stunde für eine stationäre Simulation erlaubten eine Vielzahl von Modellläufen. Die kurze Rechenzeit ermöglichte überhaupt die schrittweise Modellanpassung („trial and error“) besonders durch kleinräumige Veränderungen der Transferraten der Uferfiltration. So wurden allein bis zum Abschluß der Validierung ca. 400 Modellläufe gerechnet. Darauf aufbauend konnten dann Szenarien gerechnet werden, deren Anzahl nicht durch die Rechengeschwindigkeit des Modells begrenzt war.

Besonders aufgrund der Vereinfachungen beim Aufbau des hydrogeologischen Modells lassen sich mit diesem Konzept nur GW-Strömungsprozesse, aber keine Transportprozesse abbilden, wie bereits Sommerhäuser (1999) an einem kleineren und geologisch einfacher strukturierten Gebiet beschreibt.

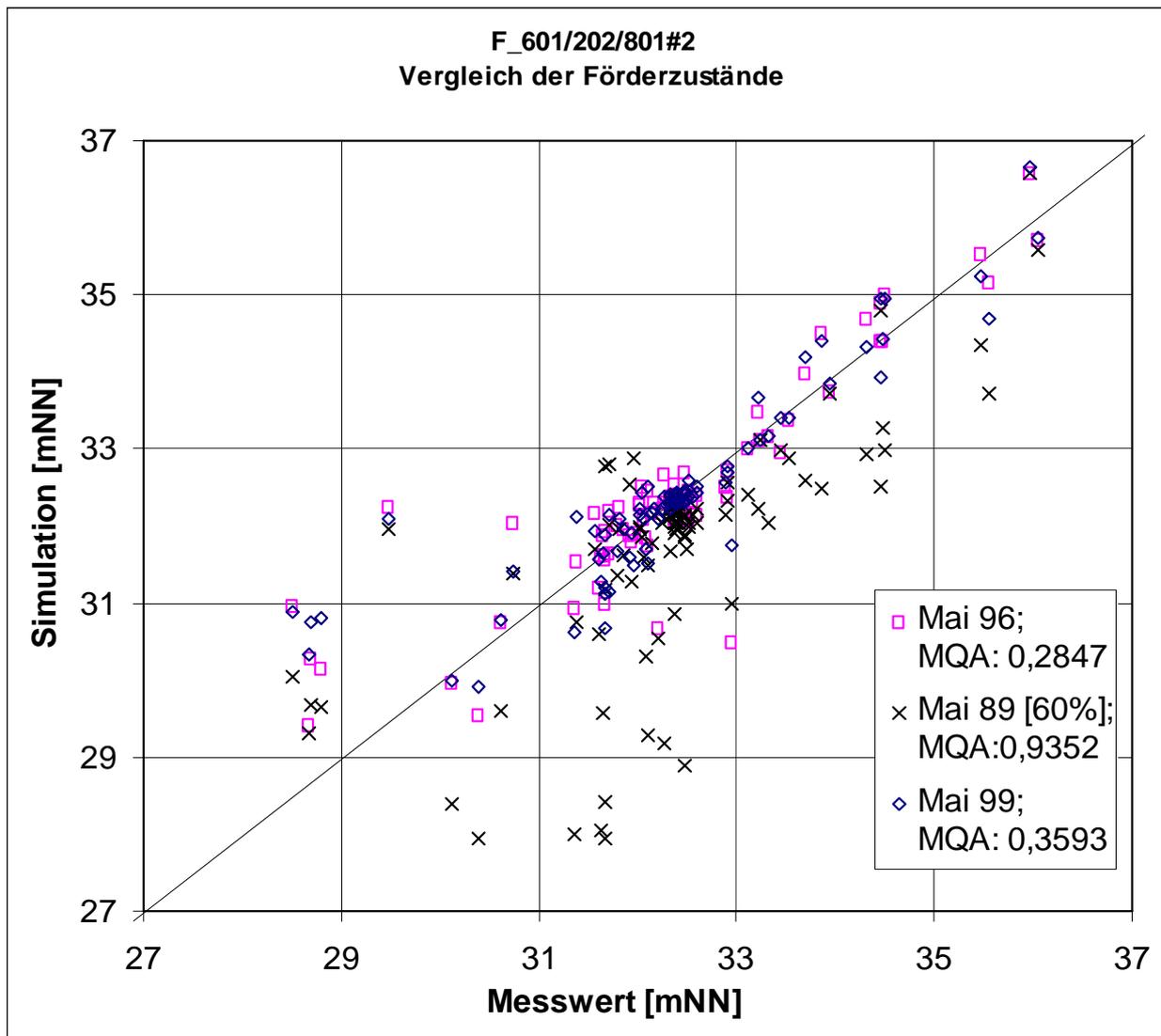


Abbildung 4.6-04: Scattergramm mit den Plots der extremen Förderzustände (Mai 1989 [60%] und Mai 1999) im Vergleich zum kalibrierten Zustand Mai 1996. Während Mai 1999 und Mai 1996 fast übereinstimmen, sind die Abweichungen für Mai 1989 auf die unsichere Datenlage zurückzuführen.

Die im folgenden Kapitel 5.0 vorgestellten Szenarien begründen sich auf Variationen der Fördermengen der Wasserwerke und Änderungen der Randbedingungen. Dies lässt sich nur verwirklichen, wenn sich das Modell als sensitiv gegenüber diesen Änderungen erweist. Im Kapitel 4.5 (Kalibrieren) und im vorliegenden Kapitel wurde deshalb die Sensitivität gegenüber Änderungen der Fördermenge, des Transferfaktors, des Randzustromes und der GWNB getestet und nachgewiesen.

4. Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 4.6-05a: Vergleich (Bilanz und MQA) der Förderzustände Mai 1996 und Mai 1999

Wasserwerk	Förderzustand (Modellauf) MQA Galerie	Mai 1996 (601)		Anteil Uferfiltrat		Mai 1999 (801)		Anteil Uferfiltrat	
		0,2847 [m³/Monat]	[m³/d]	[m³/d]	[%]	0,3593 [m³/Monat]	[m³/d]	[m³/d]	[%]
Wuhlheide	UWM	119.040	3.840	4.560	18	117.000	3.774	6.360	23
	Heber-Ost-West	660.460	21.305			756.100	24.390		
Kaulsdorf	Gesamt	353.869	11.415	ohne		479.270	15.460	ohne	
Johannisthal	Teltowkanal	520.390	16.787	12.678	36	0	0	4.398	21
	Neue Königsheide	563.660	18.183			663.972	21.418		
Friedrichshagen	A	134.090	4.325			0	0		
	B	1.837.165	59.263	31.589	43	1.088.991	35.129	46.359	56
	C	343.991	11.096			1.138.395	36.722		
	D	96.828	3.123			356.568	11.502		
	E	329.391	10.626	8.519	80	354.641	11.440	9.508	83
	F	510.204	16.458	14.637	89	944.816	30.478	27.038	89
	G	30.437	982	810	67	0	0		
	H	6.985	225			0	0		
	I	313.473	10.112	4.686	46	0	0		
	K	288.619	9.310	7.954	85	0	0		
	L	133.658	4.312	2.870	67	0	0		
M	45.044	1.453	898	62	0	0			
R	0	0			149.590	4.825	ohne		
Friedrichshagen	Gesamt	4.069.885	131.287	71.963	55	4.033.001	130.097	82.905	64
Altglienicke		0	0			0	0		
Friedrichsfelde		0	0			0	0		
Erkner	Nord	47.000	1.516	unberücksichtigt		57.133	1.843	unberücksichtigt	
	Süd	45.420	1.465			40.796	1.316		
Eichwalde		238.410	7.691	2.510	33	345.120	11.133	4.540	41
Summe Galerien		6.618.134	213.488	91.711	43	6.492.392	209.432	98.203	47
<b>Bilanz</b>	<b>Infiltration</b>	<b>(Anteil Uferfiltrat)</b>		93.878	43,97			98.646	47,09
Gesamtmodell	Exfiltration			-42.959				-52.893	
RB 3. Art	Differenz			50.919				45.753	
Bilanz	Zustrom			79.170				80.957	
Gesamtmodell	Abstrom			-17.881				-18.485	
RB 1. Art	Differenz			61.289				62.472	

Bemerkung: Rot markierte „Anteile Uferfiltrat“ beziehen sich auf mehrere Brunnengalerien eines Wasserwerkes

Tabelle 4.6-05b: Vergleich (Bilanz und MQA) der Förderzustände Mai 1989 [100%] und Mai 1989 [60%]

Wasserwerk	Förderzustand (Modellauf) MQA Galerie	Mai 1989 (203)		Anteil Uferfiltrat		Mai 1989 (*) (202)		Anteil Uferfiltrat	
		3,8013 [m³/Monat]	[m³/d]	[m³/d]	[%]	0,9352 [m³/Monat]	[m³/d]	[m³/d]	[%]
Wuhlheide	UWM	684.480	22.080	51.850	54	(*) 410.688	13.248	26.500	46
	Heber-Ost-West	2.315.510	74.694			(*) 1.389.306	44.816		
Kaulsdorf	Gesamt	634.390	20.464	ohne		634.390	20.464	ohne	
Johannisthal	Teltowkanal	483.900	15.610	35.111	54	483.900	15.610	18.783	42
	Neue Königsheide	1.522.404	49.110			(*) 913.442	29.466		
Friedrichshagen	A	676.660	21.828			676.660	21.828		
	B	1.287.320	41.526	68.962	71	1.287.320	41.526	63.757	65
	C	1.563.380	50.432			1.563.380	50.432		
	D	175.040	5.646			175.040	5.646		
	E	823.390	26.561	23.448	88	823.390	26.561	24.031	90
	F	1.318.120	42.520	39.685	93	1.318.120	42.520	39.954	94
	G	134.640	4.343	10.579	97	134.640	4.343	10.579	97
	H	201.970	6.515			201.970	6.515		
	I	385.370	12.431	5.600	45	385.370	12.431	5.600	45
	K	383.990	12.387	11.100	90	383.990	12.387	11.100	90
	L	284.570	9.180	7.965	87	284.570	9.180	7.965	87
	M	473.060	15.260	13.891	91	473.060	15.260	13.891	91
	R	0	0			0	0		
Friedrichshagen	Gesamt	7.707.510	248.629	181.230	73	7.707.510	248.629	176.877	71
Altglienicke		155.398	5.013	ohne		155.398	5.013	ohne	
Friedrichsfelde		275.703	8.894	ohne		275.703	8.894	ohne	
Erkner	Nord	199.650	6.440	unberücksichtigt		199.650	6.440	unberücksichtigt	
	Süd	228.300	7.365			228.300	7.365		
Eichwalde		k.A.				k.A.			
Summe Galerien		14.207.244	458.298	268.191	59	12.398.287	399.945	222.160	56
<b>Bilanz</b>	<b>Infiltration</b>	<b>(Anteil Uferfiltrat)</b>		276.028	60,23			230.606	57,66
Gesamtmodell	Exfiltration			-21.301				-26.167	
RB 3. Art	Differenz			254.727				204.439	
Bilanz	Zustrom			114.205				106.021	
Gesamtmodell	Abstrom			-16.779				-16.766	
RB 1. Art	Differenz			97.426				89.255	

Bemerkung: Rot markierte „Anteile Uferfiltrat“ beziehen sich auf mehrere Brunnengalerien eines Wasserwerkes; Mai 1989: Entnahme von ca. 2 Mio m<sup>3</sup> Seewasser aus dem Müggelsee hier unberücksichtigt. Anteil Uferfiltrat nur an Grundwasserentnahme