

4.5 Kalibrieren des stationären Modells

Es ist die Aufgabe der Modellkalibrierung, die Größe unbekannter Modellparameter und Randbedingungen innerhalb plausibler Grenzen so zu bestimmen, daß sich die berechneten den beobachteten Verhältnissen weitestgehend angleichen. Die zu vergleichenden Werte sind die im Modellgebiet gemessenen und simulierten Piezometerhöhen und die Massenbilanzen der Systeme von Oberflächen- und Grundwasser (an den Modellrändern und in einzelnen Teileinzugsgebieten von Brunnengalerien).

Als Ziel der Kalibrierung wird keine detailgetreue Abbildung der gemessenen einzelnen Wasserstände angestrebt, sondern das Nachvollziehen der Gesamtdynamik steht im Vordergrund. Die Anpassung der aktiven Modellbereiche entlang der Brunnengalerien und Gewässer im Modellzentrum erhält eine höhere Wichtung als die Bereiche entlang der Modellgrenzen. Die dafür notwendigerweise getroffenen Festlegungen und Verallgemeinerungen werden als Modellannahmen zusammengefaßt. Aus diesen Festlegungen leiten sich auch die zu kalibrierenden Randbedingungen ab. Aufgrund der Verallgemeinerungen lassen sich die zu erwartenden Genauigkeiten bei der Anpassung der simulierten an die gemessenen Wasserstände abschätzen.

4.5.1 Festlegung des zu kalibrierenden Zustandes und Modellannahmen

Für die Bearbeitung lagen Daten der GW-Entnahmen und der GW-Meßstellen über den Zeitraum 1989-1999 vor. Der für die Kalibrierung notwendige Vergleich von gemessenen und simulierten Wasserständen kann dabei anhand von Stichtagsmessungen zu einem repräsentativen „mittleren Förderzustand“ oder an gemittelten GW-Ständen der vorliegenden Zeitreihen erfolgen. Nach Analyse und Abgleich der Daten wurden für die Kalibrierung die Entnahmen der Wasserwerke und die Stichtagsmessungen an den Meßstellen zum Zustand Mai 1996 festgelegt. Der Förderzustand Mai 1996 entspricht einer durchschnittlichen Fördermenge über den Zeitraum 1992-99, nachdem von 1989-91 die Förderung sprunghaft abnahm (Abb. 4.5-01).

Die Gesamtförderung der Wasserwerke im Zeitraum 1989-99 sank um ca. 50%. Die Verteilung der Förderstandorte hat sich durch Stilllegung von Brunnengalerien ebenfalls geändert. So war es nicht möglich, mit den Mittelwerten der Fördermengen der vorliegenden Zeitreihen zu arbeiten und diese an ebenso gemittelten Wasserständen zu kalibrieren. Zudem fiel die Wahl auf den Zustand Mai 1996, da hier für den Betrachtungszeitraum repräsentative Durchschnittswerte der Randbedingungen gemessen wurden. Im Kapitel 4.4 wurde der Mittelwert im Randzustrom über die letzten 15 Jahre bei ca. 37 mNN festgestellt. Auch für Mai 1996 wurde diese Höhe an der Referenz-Meßstelle für den Randzustrom (Fh 32_75OP) näherungsweise gemessen. Die Höhe der GW-Neubildung ist abhängig von der Niederschlagshöhe und wirkt zeitversetzt zum Niederschlagsereignis auf den GWL. Die Niederschlagsmenge, gemessen an der Station Schöneiche, betrug 123 mm für den Mai 1996. Dies ist das 2,5-fache des 25-jährigen Mittelwertes von 48,3 mm. Allerdings geht dem eine halbjährige Trockenperiode voraus, in der nur durchschnittlich die 0,5-fache Niederschlagsmenge fiel. Daher kann für Mai 1996 von einem reduzierten Einfluß der GW-Neubildung auf die Gesamtbilanz ausgegangen werden.

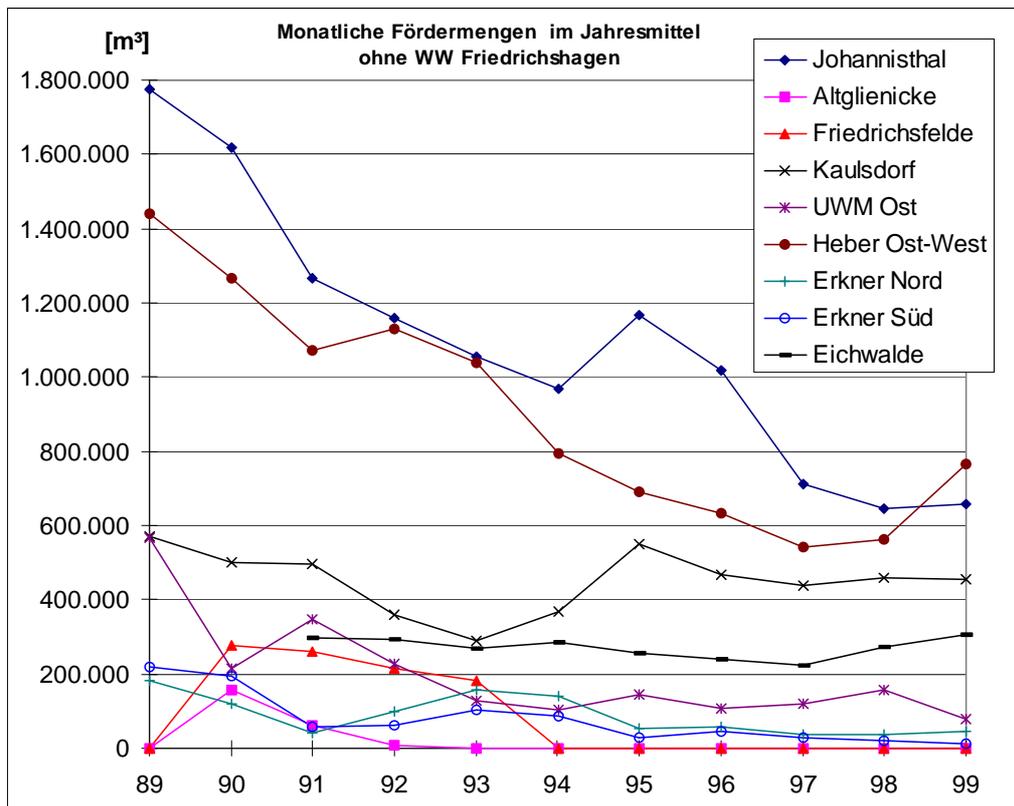


Abbildung 4.5-01a: Zeitliche Verteilung der Monatsmittelwerte der Fördermengen der Wasserwerke (ohne WW Friedrichshagen) im Zeitraum 1989-99. Für das WW Eichwalde lagen die Daten erst ab 1991 vor. Die Förderung der WW Altglienicke und Friedrichsfelde wurde 1993 bzw. 1994 eingestellt.

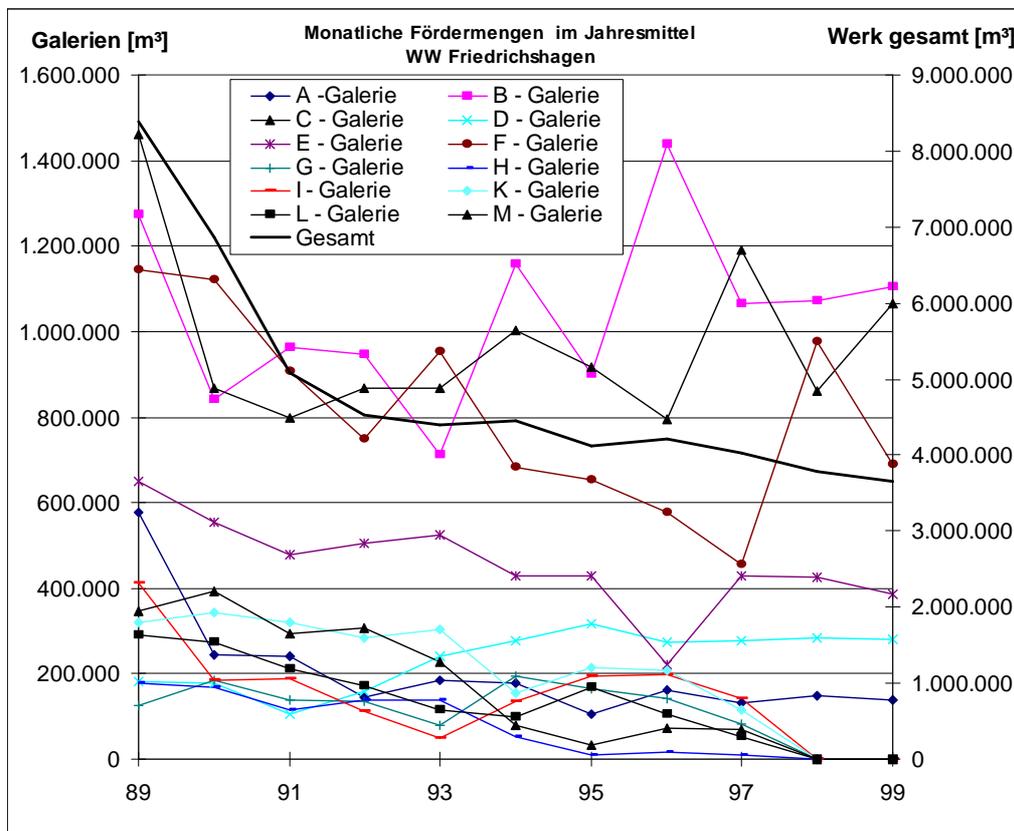


Abbildung 4.5-01b: Zeitliche Verteilung der Monatsmittelwerte der Fördermengen der einzelnen Brunnengalerien des WW Friedrichshagen im Zeitraum 1989-99 (linke Achse). Dazu im Vergleich das gesamte Wasserwerk auf der rechten Achse. Die Förderung der Galerien G-M wurde 1997 eingestellt.

Die Kalibrierung erfolgte trotzdem anhand der langjährigen Mittelwerte der GW-Neubildung. HANNAPPEL & ASBRAND (2002) wählten für ihr hydrogeologisches Strukturmodell den Zustand Oktober 1996 als „Mittelwasser anhand der Gebietswasserstände“ für das Einzugsgebiet des WW Tegel im Nordwesten Berlins aus. Hydrologisch und fördertechnisch ist der Oktober dem Mai im Modellgebiet sehr ähnlich. Er wurde auch für die Kalibrierung in Erwägung gezogen, aber aufgrund fehlender Förderung an der Galerie E (WW FDH) dann doch der Mai bevorzugt.

4.5.1.1 Modellannahmen

Jedes Modell kann nur eine vereinfachte Abbildung der realen Verhältnisse sein. Bestimmte Randbedingungen werden auch bewußt vereinfacht, wenn die Datenlage es nicht anders zuläßt oder auch mit den Vereinfachungen eine hinreichende Genauigkeit gewährleistet ist. Die für dieses Modell getroffenen Festlegungen und Verallgemeinerungen werden im folgenden zusammengefaßt.

1. Das hydrogeologische Modell wurde als Grundlage für die numerische Simulation entwickelt. Der gezielt hohe Aufwand zur Regionalisierung der geologischen Daten erfolgte mit der Absicht, die kf-Werte nicht zur Modellkalibrierung einzusetzen sondern die vergleichsweise unbekanntes Austauschraten zwischen Oberflächen- und Grundwasser (Transfer) zur Kalibrierung zu nutzen. Die aufgrund der Modellgröße getätigten Annahmen und Vereinfachungen im hydrogeologischen Modell übertragen sich aber auch auf die Genauigkeit der Simulation.
2. Die zum Kalibrieren eingesetzten Fördermengen der Wasserwerke sind keine langjährigen Mittelwerte, sondern die aus einem Monatswert gemittelten Tageswerte. Die so gewonnene Fördermenge entspricht nur näherungsweise den Entnahmen zum jeweiligen Zeitpunkt der Stichtagsmessungen.
3. Ein wechselndes Förderregime innerhalb einer Brunnengalerie konnte nicht berücksichtigt werden, so daß die Entnahmen einer Galerie immer über deren Gesamtlänge (Anzahl Brunnen/Knoten) gemittelt wurde. Besonders bei den langen und linienförmigen Brunnengalerien hat das Auswirkungen auf die Lage und Form der Absenkungen.
4. Die eingesetzte Grundwasserneubildung wurde als 30-Jahre Mittel in ihrer Verteilung einer Arbeit der HYDROGEOLOGIE GMBH (1992/93) entnommen. Allerdings wirkt die GW-Neubildung nicht als Mittel über das gesamte hydrologische Jahr, sondern nur im Winterhalbjahr, in dem geringere Evapotranspiration eine Versickerung zuläßt. Dieser Anteil konnte nicht näher für den Zustand der Modellkalibrierung aufgelöst werden. Über der Seenfläche von Zeuthener-, Seddin-, Langer- und Müggelsee sowie der Großen Krampe, mit einer Gesamtfläche von ca. 17 km², wird im Modell keine GW-Neubildung wirksam.
5. Alle im Modell berücksichtigten Oberflächengewässer mit Ausnahme der Wuhle, Erpe und dem Fredersdorfer Mühlenfließ, werden durch Stauhaltung geregelt. Damit können deren Grenzen als konstant angenommen werden. Die Uferbereiche, welche Uferfiltration zulassen, sind nach EYRICH (1982) genähert. Die genauen Transferraten sind unbekannt und werden im Verlauf der Kalibrierung angepaßt. Über den übrigen Seengebieten wird - wegen hoher

Muddemächtigkeit - im Modell kein Austausch von Oberflächen- und Grundwasser zugelassen.

6. Im Bereich der Fehlstellen im Holstein Interglazial wird eine Leckage zwischen Modellraum und liegendem GW-Leiter in Abhängigkeit der Förderraten der naheliegenden Brunnengalerien angenommen (GCI 1996). Die Quantifizierung des GW-Übertritts an der Modellbasis wird im Verlauf der Kalibrierung versucht.
7. Für die Modellränder im Norden und Südwesten wurde die äußere RB 1. Art unter der Annahme festgelegt, daß diese GW-Isohypse durch Änderungen der GW-Entnahmen weitestgehend unbeeinflusst bleibt. Allerdings können Abweichungen durch Schwankungen in der Höhe des Anstroms auf diese Grenzen dabei nicht berücksichtigt werden. Sie liegen für den Zeitpunkt der Kalibrierung lediglich im Dezimeterbereich.

Demzufolge mußten im Verlauf der Kalibrierung noch die folgenden Randbedingungen bestimmt bzw. angepaßt werden:

1. Die endgültig verwendeten äußeren Randbedingungen (Art und räumliche Verteilung).
2. Die Netzverfeinerung und Verteilung der inneren Randbedingung Transfer (3. Art) - zur Festlegung der Flächen, die den Austausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser erlauben (beinhaltet Uferfiltration).
3. Der Transferfaktor.
4. Der Leckage-Faktor im Bereich der Fehlstellen an der Modellbasis (Zu/Abstrom über die Modell-Basis).

4.5.1.2 Erwartete Genauigkeiten

Hinsichtlich der zu erwartenden Modellabweichungen können drei Einflußbereiche unterschieden werden. Sie bilden sich in Abhängigkeit von der Entfernung zu den (aktiven) Brunnengalerien und den Modellrändern aus.

1. In Brunnennähe (bis 500 m) wird das Simulationsergebnis teilweise im Meterbereich von den Meßwerten abweichen. Dies ist besonders auf Punkt 2, 3 und 6 der Modellannahmen zurückzuführen. Bei nah beieinander liegenden Brunnengalerien (Galerie B,C,D) können sich diese Fehler verstärken. Anhand der Galerie B des WW Friedrichshagen wurde der aus Punkt 3 resultierende Fehler näherungsweise bestimmt. Dazu wurde die Auswirkung abschnittsweiser Förderung (50% der Gesamtförderung) im Vergleich zur Entnahme über die Gesamtlänge simuliert. Die Unterschiede können ca. 60-400 cm betragen. Werden die Brunnen in der Osthälfte der Galerie ausgeschaltet, wird dort eine Differenz von ca. 400 cm, in der Westhälfte von ca. 120 cm simuliert. Werden die Brunnen in der Westhälfte der Galerie ausgeschaltet, wird dort eine Differenz von ca. 200 cm, in der Osthälfte von ca. 60 cm simuliert. Bei Beschränkung der Förderung auf den Mittelteil der Galerie verbleiben dort ca. 120 cm und an den Rändern im Osten ca. 200 cm und im Westen ca. 300 cm Differenz. Allerdings werden in der Wartungsroutine der Wasserbetriebe die Brunnengruppen nicht in diesem Umfang ausgeschaltet.
2. In brunnenfernen Gebieten (ca. 500-2000 m) werden Differenzen im Dezimeterbereich erwartet. Dort überlagern sich die abgeschwächten Einflüsse der brunnen nahen Bereiche mit den Auswirkungen der Modellannahmen in Punkt 1, 4 und 5.

3. Entlang der Modellränder erzeugen besonders die Modellannahmen zu den Randbedingungen (Punkt 7) Abweichungen im Dezimeterbereich.

4.5.2 Gütekriterien

4.5.2.1 Mathematisches Kriterium

Nach KINZELBACH & RAUSCH (1995) kann als Kriterium für die Anpassungsgüte der Modellrechnung, das Maß des Abstandes zwischen gemessenen und simulierten Werten, die mittlere quadratische Abweichung (MQA) verwendet werden, wie sie in der Gleichung (11) dargestellt ist.

$$MQA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^g - h_i^b)^2 \quad (11)$$

mit h^g für die gemessene, h^b für die berechnete Piezometerhöhe und n für die Anzahl der Meßwerte.

Die so errechnete Abweichung ist allerdings kein pauschaler Wert für die Güte der Simulation (KINZELBACH & RAUSCH 1995). Aber im Vergleich mehrerer Simulationsergebnisse kann so eine bessere bzw. schlechtere Anpassung der veränderten Parameter erkannt werden.

Von den weit über tausend Meßstellen im Modellgebiet mußte allerdings eine repräsentative Auswahl an Kontrollmeßstellen („Observation Wells“ - OW) getroffen werden, die den folgenden Anforderungen genügen:

- mindestens monatliche und in sich schlüssige Meßwerte über den Zeitraum 1989-99;
- Nähe zu Schlüsselpositionen im Modellraum (Brunnengalerien, Einzugsgebietsgrenzen);
- Im HGWL verfiltert.

Die hauptsächlich im Urstromtal gelegenen 112 Kontrollmeßstellen sind in Abbildung 4.5-07 dargestellt. Sie sind Grundlage für alle Berechnungen der MQA und der Darstellungen als Scattergramme. Eine Wichtung nach unterschiedlichen Einflußbereichen (Brunnennähe, Hochfläche, etc.) wurde nicht vorgenommen, wobei in der Auswertung aber Berücksichtigung fand, daß durch starke Schwankungen in einzelnen brunnennahen Meßstellen im Ergebnis die MQA mehr beeinflußt wird, als durch geringe Schwankungen in den übrigen Meßstellen.

4.5.2.2 Isolinienpläne

Als weiteres Anpassungskriterium wurden Isolinienpläne der Grundwasserstände zu Stichtagsmessungen als Vergleich zu den simulierten Zuständen dieses Zeitraumes herangezogen. Die Unterlagen der betrachteten Jahrgänge stellten die BWB zur Verfügung. Dabei ist zu beachten, daß hydrogeologisch überarbeitete Isolinien der Stichtagsmessungen einen von interpolierten Modellergebnissen abweichenden Verlauf aufweisen. So ist es nicht möglich, die in FEFLOW mit einem Interpolationsverfahren erzeugten GW-Isohypsen, den per Hand nachbearbeiteten Isolinienplänen in allen Details anzugleichen. Daher sind Isolinienpläne als Anpassungskriterium nur unter diesen Beschränkungen einzusetzen.

4.5.2.3 Kriterium Bilanz

Mit der Anpassung der Piezometerhöhen muß die Kontrolle der Gesamtwasserbilanz im Modellgebiet einhergehen. Das bedeutet, daß die Modellbilanzglieder mit den naturräumlichen Komponenten in ihrer Größenordnung übereinstimmen. Die Berechnungen bzw. Abschätzungen zur natürlichen Wasserbilanz (Abfluß Oberflächengewässer, GW-Neubildung, unterirdischer Zu/Abstrom, etc.) werden im folgenden erläutert.

Grundwasserzustrom in das Modellgebiet

Der Zustrom von den Hochflächen (Nord- und Südwestrand) kann unter bestimmten Annahmen geschätzt werden. Er sollte nur zu geringen Anteilen auf einen Wechsel im Förderregime reagieren.

Nach PRINZ (1991) errechnet sich die natürliche Fließgeschwindigkeit des Grundwassers als Abstandsgeschwindigkeit (v_a) nach der Formel (12).

$$v_a = \frac{k * I}{n_f} \quad [\text{L} * \text{T}^{-1}], \quad (12)$$

mit der Durchlässigkeit (k), dem Grundwassergefälle (I), dem durchflußwirksamen Porenanteil (n_f).

Wird der Volumenstrom je Fläche (Zufluß über einen Modellrand) gesucht, gilt die Filtergeschwindigkeit (v_f) mit dem Darcy-Gesetz in der folgenden Form (13).

$$v_f = k * I \quad [\text{L} * \text{T}^{-1}] \quad (13)$$

Aus dem Produkt von Filtergeschwindigkeit (v_f) und der durchströmten Fläche (F) errechnet sich der Volumenstrom (Q), der (z.B. über einen Modellrand) in einen Sedimentkörper einströmt (JORDAN & WEDER 1995) nach der Gleichung (14).

$$Q = k * F * I \quad [\text{L}^3 * \text{T}^{-1}] \quad (14)$$

Die Bandbreite der möglichen Zuflußmengen [Q] kann somit durch Abschätzung der minimalen und maximalen Gradienten [I] errechnet werden (Tab. 4.5-01). Die Minimalvariante ergibt sich für den Fall ohne Förderung von Grundwasser. Der natürliche Gradient liegt dann bei ca. 0,001 und weniger. Die maximale Förderung im Betrachtungszeitraum wurde für den Mai 1989 simuliert. Die verkürzten Fließwege zu den starken Absenkungen ergaben Gradienten von ca. 0,002 für den südwestlichen und ca. 0,003 für den nördlichen Zufluß (in DREISZAS, ENGELMANN et al. 1990).

Die Länge des jeweiligen Randes beträgt rund 18.000 Meter. Die durchströmte Mächtigkeit wird aus dem hydrogeologischen Modell abgeleitet und beträgt im Norden ca. 40 m (720.000 m²) und im Südwesten ca. 15 m (270.000 m²). Der kf-Wert im HGWL beträgt im Mittel $5 * 10^{-4}$ m/s (GCI 1996) mit einem nutzbaren Porenanteil von 0,2. In Tabelle 4.5-01 wird der für diese Annahmen geschätzte Zufluß angegeben. Die Werte für den zu kalibrierenden Zustand Mai 1996

sollten zwischen den jeweiligen Extremen liegen. In erster Näherung bewirkt die mittlere Förderung (Mai 1996) im nördlichen Zustrom zu den Galerien der WW Friedrichshagen, Kaulsdorf, Erkner und Wuhlheide einen Gradienten von ca. 0,002 und damit einem Zufluß von ca. 60.000 m³/d. Im Bereich des südlichen Zustromes erfolgte gegenüber 1989 eine drastische Reduzierung der Entnahmen. Das WW Altglienicke wurde stillgelegt und nur die WW Johannisthal, Eichwalde und die Galerie I (FDH) fördern noch geringe Mengen an Grundwasser aus dem Zustrom. Daher wird der Anteil im Zustrom über die Südgrenze, bei einem Gradienten von 0,001, auf ca. 10.000 m³/d geschätzt.

Tabelle 4.5-01: Abschätzung der Geschwindigkeiten und Volumenströme im Zustrom von den Hochflächen unter Verwendung der Extremwerte „ohne Förderung“ und „maximale Förderung“ sowie der „mittleren Förderung“ im Betrachtungszeitraum

Randbedingung	Gradient gerundet	Geschwindigkeit va [m/d]	Zufluß nach (14) [m³/d]
Norden, ohne Förderung der Wasserwerke	0,001	0,216	31.104
Norden, mittlere Förderung der Wasserwerke	0,002	0,432	62.208
Norden, maximale Förderung der Wasserwerke	0,003	0,648	93.312
Südwesten, ohne Förderung der Wasserwerke	0,001	0,216	11.664
Südwesten, mittlere Förderung der Wasserwerke	0,001	0,216	11.664
Südwesten, maximale Förderung der Wasserwerke	0,002	0,432	23.328

Oberflächengewässer

Der Zufluß der Oberflächengewässer in das Modellgebiet wird im wesentlichen durch die Wasserführung von Spree, Dahme/Nottekanal und Oder-Spree-Kanal bestimmt. Der Zufluß in das Modellgebiet schwankt im Jahresverlauf 1996 im Bereich 22 m³/s bzw. 1.900.800 m³/d (August) bis 48 m³/s bzw. 4.147.200 m³/d (Mai). Daneben gelangen über die kleineren Zuflüsse (Fredersdorfer Fließ, Neuenhagener Fließ, Wuhle, Flakenfließ/Löcknitz) im Durchschnitt 5 m³/s bzw. 432.000 m³/d in die Spree (SENSTADT 1996).

In den Müggelsee gelangen nach BEHRENDT et al. (2001) anteilig zwischen 6 m³/s bzw. 518.400 m³/d (Oktober) und 10 m³/s bzw. 864.000 m³/d (Mai), die dort einer geschätzten Wasserwerksentnahme (Uferfiltrat) von ca. 0,5-1,3 m³/s gegenüberstehen.

Grundwasserneubildung

Aus der Verteilung der Grundwasserneubildung im 30-Jahre-Mittel (HYDROGEOLOGIE GMBH 1992/93, Abb. 4.4-04) errechnet sich in FEFLOW, durch Interpolation der Flächenanteile über das Modellgebiet, eine Gesamtmenge von 101.285 m³/d.

Transferfaktor

Der Transferfaktor (leakage parameter) Φ berechnet sich in FEFLOW für die Strömung im ungespannten Grundwasser nach der Formel (15) für die Ex- bzw. Infiltration.

$$\Phi = \frac{k_0}{d} \quad [\text{T}^{-1}] \quad (15)$$

mit k_0 als Durchlässigkeitsbeiwert und d als Mächtigkeit der Kolmationsschicht.

Im allgemeinen (GCI 1996) wird für die Gewässer im Raum Berlin für k_0 ein Wert von $1 \cdot 10^{-6}$ [m/s] angenommen. Wählt man für $d = 0,1$ Meter, so erhält man einen Leakagekoeffizient (15) von $0,864 \cdot \text{d}^{-1}$, mit $d = 0,2$ Meter dementsprechend $0,432 \cdot \text{d}^{-1}$.

Als Anfangswert für die Kalibrierung wird $0,5 \cdot \text{d}^{-1}$ als einheitlicher Transferfaktor entlang aller Oberflächengewässer gewählt.

Abschätzung Gesamtbilanz

Im Modellgebiet ergibt sich durch GW-Förderung ein negativer Bilanzanteil von $213.487 \text{ m}^3/\text{d}$. Davon werden rund 50% durch Uferfiltration den Oberflächengewässern entnommen. Diese Kopplung wird durch die RB 3. Art realisiert. Der Entnahme aus den Oberflächengewässern steht ein Gebietszufluß über die Oberflächengewässer von ca. $4.500.000 \text{ m}^3/\text{d}$ gegenüber. Der rein grundwasserseitigen Entnahme von ca. $110.000 \text{ m}^3/\text{d}$ stehen ca. $101.000 \text{ m}^3/\text{d}$ Grundwasserneubildung und ca. $70.000 \text{ m}^3/\text{d}$ Zustrom über die Modellgrenzen gegenüber. Somit kann von einer positiven Gesamtbilanz ausgegangen werden.

4.5.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung am stationären Modell mit dem Förderzustand Mai 1996 wurde in zwei große Abschnitte unterteilt. Die Anpassung der Parameter und Randbedingungen erfolgte unter Verwendung der „trial and error“ Methode mit mehreren hundert Modelldurchläufen.

Für die ersten Modellrechnungen wurden die Randbedingungen in den aus den Abschätzungen abgeleiteten Größenordnungen sowie ein relativ grobes FE-Netz genutzt.

Dann erfolgte die detaillierte und kleinräumige Variation der inneren Randbedingung „Transfer“ verbunden mit Änderungen der Netzdichte sowie eine Anpassung der Basis-Leckage.

Als Anpassungskriterien kamen am Anfang der Vergleich mit Isolinienplänen und dann vorwiegend das mathematische Kriterium (MQA) und die Optimierung der Bilanz zur Anwendung. Dies wurde so oft wiederholt, bis keine wesentlich bessere Modellanpassung mehr erzielt wurde und die Modellabweichungen innerhalb der erwarteten Genauigkeiten (Modellannahmen) lagen.

4.5.3.1 Festlegen der äußeren Randbedingungen

Am nördlichen und südwestlichen Modellrand mußte ein Zustrom aus den Einzugsgebieten in das Modellgebiet simuliert werden. Dafür kamen die Randbedingungen (RB) 1. und 2. Art in Frage, deren Verwendung in FEFLOW zu ähnlichen Ergebnissen führt. Die jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert Sommerhäuser (1999).

Der Vorteil der RB 2. Art ist der sich den entsprechenden Bedingungen anpassende Wasserstand entlang der Grenze. Allerdings lagen keinerlei Daten vor, um den Zustrom zu quantifizieren.

Daher wurde näherungsweise mit der Abschätzung aus Tabelle 4.5-01 gerechnet, wobei Volumenanteile im Zustrom entsprechend der GWL-Mächtigkeit auf die jeweiligen Knoten übertragen wurden. Im Vergleich zum Einsatz der RB 1. Art wurde keine wesentlich bessere Anpassung erzielt. Da die RB 1. Art in FEFLOW einfacher zu handhaben und für die zu rechnenden Szenarien leichter zu variieren ist, kam diese im weiteren zum Einsatz. Der damit verbundene Nachteil eines festen Wasserstandes entlang der Grenze wird durch die ausreichende Entfernung des Randes zu den Brunnengalerien wieder kompensiert.

Entlang der Gewässer an der östlichen Grenze kann die RB 3. Art verwendet werden, um den Austausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser zu simulieren. Während für die Gewässer im Modellgebiet die Transferraten und wirksamen Uferregionen aus den Arbeiten von EYRICH (1982) und GCI (1996) abgeleitet werden konnten, sind diese Angaben für die Gewässer am Ostrand nicht verfügbar. Ebenso blieb dabei ein möglicher GW-Strom unberücksichtigt. Es erfolgten daher vergleichende Simulationen unter Verwendung der RB 3. Art bzw. RB 1. Art. Im Vergleich zum Einsatz der RB 1. Art wurde durch Nutzung der RB 3. Art kein Vorteil erkennbar. Daher kam hier ebenso die unter Verwendung der Gewässershöhen eindeutig definierbare RB 1. Art zur Anwendung.

4.5.3.2 Netzdicke und Transferrandbedingung

Der Kalibrierung von Transfer und Transferrate (RB 3. Art), also dem Austausch von Oberflächen- und Grundwasser, kam eine Schlüsselrolle zu, da ein Modellziel die Abschätzung der Anteile von Uferfiltraten an der GW-Entnahme war. Dieser Vorgang ist eng mit der Variation der Netzdicke verknüpft, da die Transferrate nicht nur über den Transferfaktor, sondern auch über die Anzahl der Netzknoten je Fläche und deren Verbindungen zwischen den Modell-GWL kontrolliert wird. In FEFLOW kann der Transfer nur an Flächen wirksam werden, die (vertikal oder/und horizontal) von angrenzenden Netzknoten gebildet werden. Je mehr Knoten je Fläche (oder Volumen) aktiv sind, um so genauer kann dieser Austauschprozeß variiert und simuliert werden.

Wird im FE-Netz die Anzahl der Knoten erhöht, verbessert sich nicht nur die Rechengenauigkeit in diesen Bereichen. Durch den erhöhten Rechenaufwand steigt auch die Dauer eines Modelldurchlaufes. Dieser Aspekt wird hier hoch gewichtet, da eine Vielzahl von Szenarien mit dem kalibrierten Modell gerechnet werden sollen. Zudem sollte die Netzdicke mit der im hydrogeologischen Modell erreichten Auflösung (Regionalisierung) der Modellparameter und den verwendeten Randbedingungen im Einklang stehen.

In Tabelle 4.5-02 ist die Entwicklung der Netzdicke im Verlauf der Kalibrierung zusammengefaßt. Der Verlauf läßt sich in die fünf Abschnitte A - E und dem Ergebnis F unterteilen. Im Abschnitt A wurde der maximale Knotenabstand (mittlere Netzdicke) für das gesamte Modellgebiet festgelegt.

Die gleichmäßige Verteilung der Netzknoten mit einem durchschnittlichen Abstand von 200 Metern sollte die Basis für die weiteren lokalen Diskretisierungen sein. Dieser Knotenabstand entspricht dem mittleren Abstand der Netzknoten (Minimum: 70 m), die entlang der Brunnengalerien mit der RB 4. Art belegt wurden.

Tabelle 4.5-02: Entwicklung der Netzdichte im Verlauf der Kalibrierung. Durch die Abschnitte A-E werden wichtige Zwischenschritte im Fortgang der Kalibrierung gekennzeichnet. Im Abschnitt F wird der Netzaufbau für den kalibrierten Zustand beschrieben.

Modell (NAME.fem)	Elemente	Knoten	Veränderungen am FE-Netz/ Modell- GWL	Auswirkungen/ Knotenabstand (KA)
A: FE-Netze im Ausgangszustand ohne weitere Verfeinerung				
Basismodell 2D, alle_e1.fem	18.238	9.340	Ein Modell-GWL	KA modellweit ca. 200 m (100 bis 300 m)
Basismodell 3D, N3D_Zu2_alle.fem	219.768	121.914	Einfügen von zwölf Modell-GWL	KA modellweit ca. 200 m (100 bis 300 m)
B: FE-Netz-Entwicklung durch Verfeinerung entlang der Kanäle, Flüsse und Uferbereiche der Seen (Grobkalibrierung)				
Rand_2.fem	385.824	214.7241	Erste Diskretisierung entlang aller Gewässer (außer Fließe)	KA entlang Gewässer ca. 100 m (50 bis 150 m)
Vali_003.fem	551.000	301.606	Zweite Diskretisierung entlang aller Gewässer (außer Fließe und Müggelsee)	KA entlang Gewässer ca. 50 m (10 bis 100 m)
C: FE-Netz-Entwicklung durch Verfeinerung im Bereich der Brunnengalerien (Grobkalibrierung)				
Vali_040.fem	607.836	332.037	Verfeinerung entlang der RB. 4. Art	KA entlang Galerien ca. 10-50 m
D: FE-Netz-Entwicklung durch Verfeinerung im Bereich der Fließgewässer um das WW JOH (Feinkalibrierung)				
Vali_186.fem	740.592	404.365	Erste Verfeinerung entlang der Spree und Kanäle um WW JOH	KA dort ca. 25 m
Vali_186e.fem	1.051.284	572.741	Zweite Verfeinerung entlang der Kanäle um WW JOH	KA dort ca. 15 m
E: FE-Netz-Entwicklung durch Verfeinerung im Bereich von Wuhle, Erpe und Fredersdorfer Mühlenfließ (Feinkalibrierung)				
Vali_186g.fem	1.102.224	600.340	Erste Diskretisierung entlang der Fließe	KA dort ca. 20-50 m
Vali_188.fem	1.336.704	727.402	Zweite Diskretisierung entlang der Fließe	KA dort ca. 10-25 m
F: Endgültiges FE-Netz für das kalibrierte Modell und als Grundlage für die Szenarien				
Kalibrierter Zustand Vali_601/651.fem	607.836 (eine Schicht 50.653)	332.371	Rücknahme der Verfeinerungen unter Abschnitt D und E	KA Gewässer (ohne Müggelsee) und Brunnengalerien ca. 10-50 m KA Müggelsee ca. 50-150 m KA übriger Modellraum ca. 100- 300 m

Dieses Netz ermöglichte bereits eine grobe Realisierung des Strömungsproblems. Aber der Transfer zwischen Oberflächen- und Grundwasser konnte durch den hohen Knotenabstand entlang der Uferbereiche nur durch eine Knotenreihe (über drei Modell-GWL) abgebildet werden. Dies ermöglichte nur eine grobe Variation der Austauschprozesse. Außerdem gab es zwischen den aktiven Knoten der GW-Förderung keinerlei Auflösung. Eine bessere Modellanpassung war nur durch Netzverfeinerung zu erreichen.

Im Abschnitt B und C wurde daher das Netz entlang der besonders aktiven Modellbereiche (GW-Förderung und Uferfiltration) durch weitere Verfeinerung hoch aufgelöst. Der Bereich im Verlauf der Brunnengalerien und kanalartigen Gewässer sowie die Uferbereiche der seenartigen Gewässer wurde auf einer Breite von 200-400 Metern diskretisiert. Die Seenflächen mit Muddeverbreitung (EYRICH 1982) blieben unberücksichtigt, da hier die Transferrate Null gesetzt wurde.

Durch den geringeren Knotenabstand entlang der Gewässer(Ufer)bereiche konnte die Randbedingung durch drei nebeneinander liegenden Knotenreihen (statt einer) dargestellt werden. Gleichzeitig wurde der Wirkungsbereich der RB 3. Art auf den Modell-GWL 1 begrenzt, da dort die Uferfiltration im wesentlichen auch nur wirksam wird.

Unter Verwendung des mittleren Transferfaktors ($0,5 \text{ d}^{-1}$) wurden im Bereich des Müggelsees und des Langen Sees gute Anpassungen erreicht. Große Ungenauigkeiten traten dagegen entlang des Gosener Kanals, im Einzugsgebiet des WW Johannisthal und im nördlichen Anstrom des Modellgebietes auf. Entlang des Gosener Kanals erschien der Transferfaktor zu hoch und im nördlichen Anstrom fehlten noch die drei Fließe in der Bilanz.

Das Einzugsgebiet des WW Johannisthal ist wegen der komplizierten hydrogeologischen Bedingungen schwierig nachzubilden. Es ist von drei Seiten direkt von kanalartigen Gewässern begrenzt, von denen die hydraulischen Verbindungen (Uferfiltration) nicht bekannt bzw. durch Simulation von GCI (1996) geschätzt worden sind. Unter Einsatz des mittleren Transferfaktors wurden die starken Absenkungen (bis 28 mNN) an der Teltowgalerie um mehrere Meter zu hoch simuliert. Die Uferfiltratmengen wurden daher als zu hoch eingeschätzt. Um den Anteil der spreeseitigen Uferfiltrate besteht Konkurrenz mit den Entnahmen des WW Wuhlheide. Ein Kontakt der beiden Einzugsgebiete unter der Spree wird nur bei hohen Förderraten angenommen, ist aber nicht auszuschließen. Zudem bezieht Johannisthal noch Grundwasser aus dem Bereich der Teltowhochfläche (südlicher Anstrom im Modellgebiet) unter dem Teltowkanal hindurch. Letztlich wirkt im Bereich der Brunnengalerien auch noch der hydraulische Kontakt zum 3. Grundwasserleiter mit unbekanntem Leckagemengen. Dieser Einflußfaktor wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

Zuerst soll die weitere Anpassung durch Netzverfeinerung und abschnittsweise Änderung des Transferfaktors dargestellt werden. Um im Bereich des WW Johannisthal und am Gosener Kanal die Transferraten zu verringern, kann die für diese Randbedingung wirksame Fläche reduziert werden. Bisher wirkt sie bei einem mittlerem Knotenabstand von ca. 50 Metern, auf einer Breite von ca. 100 Metern entlang der Kanäle. Durch eine weitere Netzverfeinerung (Tab. 4.5-02, Abschnitt D) um ca. 250.000 Knoten wurde versucht, den Wirkungsbereich auf die reale Kanalbreite anzupassen. Gleichzeitig erfolgte auf diese Art und Weise die Einbindung der Fließe im nördlichen Anstrom. Die Simulation erbrachte für den Bereich Gosener Kanal eine bessere Anpassung.

Für den wichtigeren Bereich um das WW Johannisthal zeigten diese Veränderungen nur minimalen Erfolg. Die Netzverfeinerung war also für dieses Problem nicht der sensitive Parameter und wurde dort wieder zurückgenommen.

Um den Einfluß der Fließe zu modellieren wurde allein in deren Verlauf das Netz um weitere 150.000 Knoten verdichtet (Tab. 4.5-02, Abschnitt E). Selbst ein Knotenabstand von 10-25 Metern erwies sich aber als zu gering (grob) auflösend. Hinzu kamen ungenügende Kenntnisse über den Sohlverlauf und die Infiltrationsraten. Letztere wurden ebenfalls über mehrere Modellläufe variiert. Die Simulation erzeugte stark abweichende Bilanzen (BWB 2002) und zu stark beeinflusste GW-Isolinien im Bereich der Fließe. Hinzu kamen enorm verlängerte Rechenzeiten von FEFLOW und hoher Aufwand zur Netzverfeinerung sowie Einbindung der Randbedingung. Modellaufbau und -auflösung sind nicht geeignet, um solche lokal geringen

Einflüsse abzubilden. Die Einbindung der Fließe als Randbedingung und die damit einhergehende Netzverfeinerung wurden ebenfalls wieder rückgängig gemacht.

Tabelle 4.5-03: Definition der Transfer wirksamen Uferbereiche im Modell durch unterschiedlich viele aktive Modell-GWL (vertikal) und Knotenreihen sowie deren Abstände (horizontal).

Transfer wirksame Bereiche	Modell-GWL	Knotenabstand und Anordnung
Mudde-freie Uferbereiche der seen-artigen Gewässer (außer Müggelsee)	1	3-4 Knotenreihen im Abstand von 10-50 m
	2	wie Modell-GWL 1, aber um 1-2 Knotenreihen von außen reduziert
Mudde-freie Uferbereiche des Müggelsees	1	3-4 Knotenreihen im Abstand von 50-150 m
	2	wie Modell-GWL 1, aber um 1-2 Knotenreihen von außen reduziert
Verlauf der Spree	1	3 Knotenreihen im Abstand von 10-50 m
	2	wie Modell-GWL 1, aber auf mittlere Knotenreihe reduziert
Verlauf Gosener Kanal	1	3 Knotenreihen im Abstand von 10-50 m
Verlauf Teltowkanal	1	2 Knotenreihen im Abstand von ca. 50 m

Aus der teilweisen Rücknahme der Netzverfeinerung und lokalen Anpassungen resultierte der endgültige Aufbau des FE-Netzes, welcher auch Grundlage für die Kalibrierung der übrigen Parameter war (Tab. 4.5-02, Abschnitt F). Die Netzdichte entlang der Transfer wirksamen Modellbereiche beschreibt im Detail Tabelle 4.5-03.

4.5.3.3 Variation der Transferfaktoren

In diesem Kapitel soll diskutiert werden, in wieweit sich die Änderung des Transferfaktors entlang der aktiven Uferbereiche auf das Modellergebnis auswirkt. Dabei wird die Verwendung von einheitlichen Werten für das Gesamtmodell mit der differenzierten Belegung von Gewässerabschnitten verglichen. Der Schwerpunkt der Betrachtung lag dabei besonders auf dem Einzugsgebiet des WW Johannisthal, da dort noch die größten Abweichungen zwischen Simulation und Meßwerten vorlagen.

Über den Transferfaktor wird im Modell der Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser simuliert. Das gilt sowohl für die Infiltration und auch die Exfiltration. Bei den hier genannten Simulationen gilt für beide Richtungen jeweils der gleiche Transferfaktor, so daß immer nur ein Wert angegeben wird.

Im Modellgebiet dominiert dabei besonders die Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser, da die meisten Brunnengalerien in Gewässernähe hohe Anteile an Uferfiltraten gewinnen. Da ohne diese „erzwungene“ Infiltration im Urstromtal hydraulisch nur Exfiltration möglich ist, kann in der Modellbilanz die Infiltration mit dem Anteil Uferfiltrat gleichgesetzt werden. Der mögliche Einfluß der Transferfaktoren auf die Uferfiltratanteile und die Grundwasserdynamik im gesamten Einzugs einer Brunnengalerie hängt von deren Lage im Modellraum ab. Brunnengalerien mit „Insellage“ im Gebiet zwischen Spree und Dahme bzw. Teltowkanal (z.B.: Galerie E) nutzen zum überwiegenden Teil Uferfiltrate. Eine Änderung des Transferfaktors hat somit direkten Einfluß auf die GW-Dynamik. Bei Brunnengalerien, die

anteilig vom landseitigen Zustrom und Uferfiltrat gespeist werden (z.B.: Galerie D), reduziert sich der Einfluß des Transferfaktors auf die Gesamtdynamik entsprechend.

Bei Verwendung eines einheitlichen Transferfaktors für alle aktiven Uferbereiche erbrachte der Bereich mit Werten zwischen 0,1 bis 0,5 d⁻¹ die beste Modellanpassung (Tab. 4.5-04). Im westlichen Modellraum (Einzug WW JOH, WUH, KAU) führte die Verwendung der niedrigen Transferfaktoren (0,1 d⁻¹) zu einer besseren Modellanpassung, im östlichen Modellraum (Einzug WW FDH, EW, ERK) die der höheren Transferfaktoren (0,5 d⁻¹).

Für die Kalibrierung wurden Simulationen mit einer schrittweisen Änderung der Transferfaktoren im Wertebereich von 0,0002-10 d⁻¹ durchgeführt. Die Kontrolle erfolgte unter hoher Wichtung der bilanzseitigen Kriterien. Transferfaktoren >0,5 d⁻¹ führen zwar auch zu einer guten optischen und mathematischen Modellanpassung, aber dann wirkt die RB 3. Art tendenziell wie eine RB 1. Art. Eine Änderung im Förderregime der ufernahen Brunnengalerien würde einzig eine Änderung in der Transferrate bewirken. Bei Transferfaktoren <0,1 d⁻¹ werden besonders im Bereich des WW Friedrichshagen extreme Absenkungen simuliert. Betrachtet man zudem den gleichen Fall ohne Förderung der Wasserwerke, werden im Urstromtal Wasserstände simuliert, die teilweise über GOK liegen. In beiden Fällen stimmen die Bilanzen nicht. Ein Vergleich der Bilanzen - und dabei speziell die Uferfiltratanteile der einzelnen Brunnengalerien - für die drei Faktoren 0,1 d⁻¹, 0,5 d⁻¹, 1,0 d⁻¹, erfolgt in Tabelle 4.5-04.

Für eine genauere Differenzierung wurde eine kleinräumige Anpassung der Transferfaktoren vorgenommen. Die für den Transfer wirksamen Uferbereiche wurden dafür in 74 Flächen unterteilt. Die Abschnitte sind jeweils anteilig nur einem Einzugsgebiet zugeordnet und ca. 1-2,5 km lang (Abb. 4.5-03). Ausgehend vom Transferfaktor 0,5 d⁻¹ erfolgte abschnittsweise eine manuelle Anpassung der Faktoren. Die Güte der Anpassung wurde nur optisch überprüft. Die Zuweisung der Faktoren zu den Flächen und das Protokoll der Änderungen wurde mittels einer Datenbank realisiert. Die verwendeten Faktoren lagen im Wertebereich von 0,005 d⁻¹ bis 2,0 d⁻¹. Es wurden mehrere Verteilungsmuster simuliert, in deren Ergebnis drei Bereiche mit unterschiedlichen mittleren Transferfaktoren ausgegrenzt werden konnten, die zur besten Modellanpassung führten:

1. Mittlere Transferfaktoren von 0,05-0,10 d⁻¹ (Min.: 0,0068, Max.: 1,45)
Für Spree und Teltowkanal westlich von Köpenick - im Einzug der WW Johannisthal und Wuhlheide.
2. Mittlere Transferfaktoren von 0,15-0,20 d⁻¹ (Min.: 0,02, Max.: 0,5)
Für Müggelspree und Müggelsee Nordufer - im Einzug der Nordgalerien des WW Friedrichshagen und des WW Erkner.
3. Mittlere Transferfaktoren von 0,30-0,35 d⁻¹ (Min.: 0,02, Max.: 1,0)
Für die Dahme und den südlichen Müggelsee - im Einzug der Südgalerien des WW Friedrichshagen und des WW Eichwalde.

Die Bilanzen von zwei Verteilungsmustern sind zum Vergleich mit den einheitlichen Transferfaktoren in Tabelle 4.5-04 aufgeführt. Die abschnittsweise Anpassung der Transferfaktoren führte für diesen speziellen Förderzustand zu einer besseren Modellanpassung, als die Ergebnisse bei Nutzung eines einheitlichen Wertes.

Tabelle 4.5-04: Vergleich (Bilanz und MQA) der unterschiedlichen Transferfaktoren bei der Simulation ohne Basis-Leckage: 0,5 d-1 ist endgültig kalibrierter Zustand

Mai 1996	Transfer (Modellauf)		0,1/d (617)		0,5/d (601)		1,0/d (618)		Verteilung A (615)		Verteilung B (616)		
	Modellanpassung	MQA	0,2648	↗	0,2847	○	0,2920	↘	0,2294	↑	0,2237	↑	
		Mai 1996	Anteil	Uferfiltrat	Anteil	Uferfiltrat	Anteil	Uferfiltrat	Anteil	Uferfiltrat	Anteil	Uferfiltrat	
Wasserwerk	Galerie	[m ³ /Monat]	[m ³ /d]	[m ³ /d]	[%]	[m ³ /d]	[%]	[m ³ /d]	[%]	[m ³ /d]	[%]	[m ³ /d]	[%]
Wuhlheide	UWM	119.040	3.840	4.200	17	4.560	18	4.900	19	3.100	12	2.800	11
	Heber-Ost-West	660.460	21.305										
Kaulsdorf	Gesamt	353.869	11.415	ohne		ohne		ohne		ohne		ohne	
Johannisthal	Teltowkanal	520.390	16.787	8.314	24	12.678	36	13.557	39	3.000	9	3.294	9
	Neue Königsheide	563.660	18.183										
Friedrichshagen	A	134.090	4.325	ohne		ohne		ohne		ohne		ohne	
	B	1.837.165	59.263	30.659	42	31.589	43	32.605	44	31.483	43	30.886	42
	C	343.991	11.096										
	D	96.828	3.123										
	E	329.391	10.626	7.661	72	8.519	80	8.850	83	7.938	75	8.043	76
	F	510.204	16.458	14.290	87	14.637	89	14.664	89	13.972	85	14.214	86
	G	30.437	982	374	31	810	67	970	80	608	50	660	55
	H	6.985	225										
	I	313.473	10.112	4.330	43	4.686	46	4.900	48	5.330	53	5.400	53
	K	288.619	9.310	8.220	88	7.954	85	8.200	88	8.062	87	8.170	88
L	133.658	4.312	2.890	67	2.870	67	2.910	67	2.759	64	2.850	66	
M	45.044	1.453	686	47	898	62	1.000	69	855	59	856	59	
R	0	0											
Friedrichshagen	Gesamt	4.069.885	131.287	69.110	53	71.963	55	73.935	56	71.007	54	71.079	54
Erkner (unberücksichtigt)	Nord	47.000	1.516										
	Süd	45.420	1.465										
Eichwalde		238.410	7.691	2.033	26	2.510	33	2.770	36	2.091	27	1.950	25
Summe Galerien		6.618.134	213.488	83.657	39	91.711	43	95.426	45	79.198	37	79.123	37
Gesamtmodell RB 3. Art	Bilanz	Infiltration	(Anteil Uferfiltrat)	84.372	↓	93.878	○	96.582	↗	80.342	↓	79.819	↓
		Exfiltration		-33.832	↓	-42.959	○	-45.528	↗	-28.989	↓	-29.106	↓
		Differenz		50.540	→	50.919	○	51.054	→	51.353	→	50.713	→
Gesamtmodell RB 1. Art	Bilanz	Zustrom		79.569	→	79.170	○	78.999	→	78.717	→	79.328	→
		Abstrom		-17.877	→	-17.881	○	-17.857	→	-17.839	→	-17.823	→
		Differenz		61.692	→	61.289	○	61.142	→	60.878	→	61.505	→

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

Wichtung der Veränderungen der MQA und Bilanzanteile durch Variation des Transferfaktors im Vergleich zum Wert Transfer=0,5/d:

○: Vergleichswert (kalibriert) ↑: viel größer ↗: etwas größer →: gleichbleibend ↘: etwas geringer ↓: viel geringer

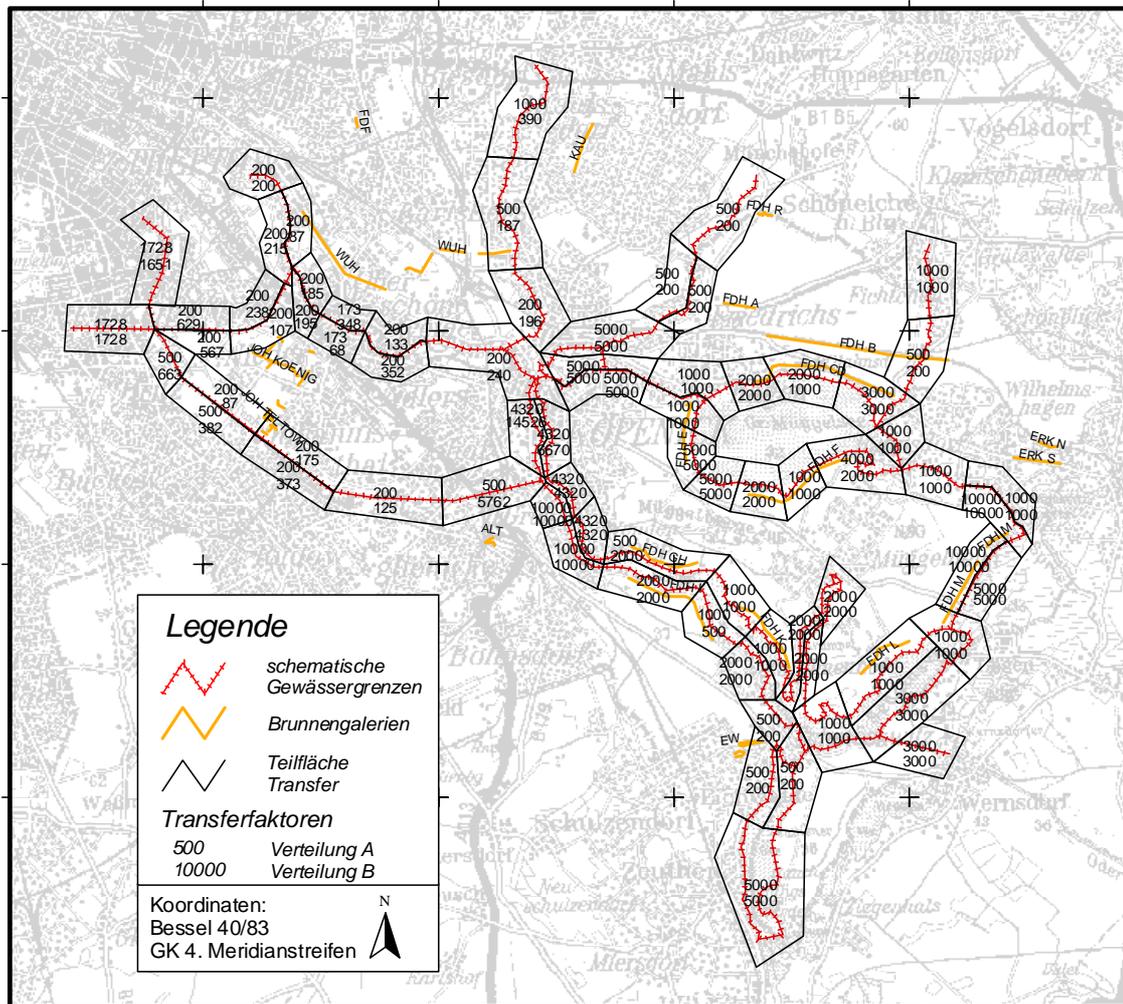


Abbildung 4.5-03: Gliederung der Uferbereiche in 74 Teilflächen zur kleinräumigen Anpassung der Transferfaktoren. In jeder Teilfläche sind die Werte für Verteilung A und B ($\cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1}$) übereinander dargestellt.

Diese Methodik erlaubte insbesondere die wesentlich zu hoch simulierten Wasserstände (ca. 300 cm) an der Teltowgalerie des WW Johannisthal teilweise zu korrigieren (siehe oben). Durch Verringerung des Transferfaktors entlang des Teltowkanals und auch der Spree konnte eine bis zu 100 cm tiefere Absenkung simuliert werden. Zur vollständigen Anpassung an dieser Stelle reichte der Parameter Transfer nicht aus. Daher wird dieser Bereich in der Fehlerdiskussion noch einmal behandelt.

4.5.3.4 Variation von Zu- und Abstrom an der Basis

Einen entscheidenden Einfluß auf die GW-Strömung im Hauptgrundwasserleiter können hydraulische Verbindungen zum liegenden GWL haben. Sie entstehen durch unterschiedliche Druckhöhen innerhalb der GWL, die sich dann an den Leckagen ausgleichen. Auch wenn diese Differenzen im natürlichen Fließsystem nicht sehr bedeutend sind, können sie im Bereich der Absenkungen durch GW-Entnahmen künstlich hervorgerufen und verändert werden. Bestehende Druckunterschiede können so auch abgeschwächt werden.

Da keinerlei quantitative Angaben über die Austauschprozesse vorliegen, wurde im Rahmen der Kalibrierung versucht, durch die Modellierung von Leckagen eine bessere Modellanpassung in Schlüsselbereichen (WW JOH) zu erreichen. So konnte zwar die Sensitivität des Modells für Leckagen an der Modellbasis nachgewiesen werden, aber eine fehlende Bestätigung der Simulation durch Meßwerte ließ eine weitere Verwendung im Rahmen der Arbeit nicht zu.

Im hydrogeologischen Modell (Kap. 3.0) wurden im Urstromtal mehrere Bereiche kartiert, die aufgrund geologischer Fenster im Holstein Interglazial hydraulische Verbindungen über die Modell-Basis zulassen.

Drei Bereiche liegen in dem für die Modellgenauigkeit wichtigen direkten Einflußbereich von Brunnengalerien:

1. Ein ca. 2 km breiter Streifen südöstlich vom Müggelseeufer, entlang der Großen Krampe, bis ca. 1 km südwestlich vom Langen See, im Einfluß der Galerien F und K des WW Friedrichshagen.
2. Ein Bereich, der sich in ca. 2 km Breite zwischen Spree und Teltowkanal genau unterhalb der Fassungen des WW Johannisthal erstreckt.
3. Ein 1 km² großes Fenster nordwestlich der Heber-Galerie-West des WW Wuhlheide.

Zusätzlich wurden noch drei Gebiete berücksichtigt, die nicht in Modell-Schlüsselgebieten liegen.

4. Ein ca. 17 km² großes Gebiet südlich des Teltowkanals, mit Anschluß an Punkt 2, im Einfluß des WW Johannisthal.
5. Ein kleines Fenster bei Adlershof (ca. 2 km²).
6. Ein kleines Fenster nordöstlich vom WW Erkner (ca. 2 km²).

Der erste Bereich wurde im Verlauf der Kalibrierung nicht berücksichtigt, da dort bereits eine gute Anpassung vorlag. Zudem sind die Entnahmemengen relativ gering und wurden noch weiter verringert als die Südgalerien des WW Friedrichshagen 1997 außer Betrieb gingen.

Die Bereiche unter Punkt 2 und 3 liegen im direkten Einfluß der durch hohe Fördermengen gekennzeichneten WW Johannisthal und Wuhlheide. Unterhalb des WW Johannisthal wurde ein Austausch mit dem liegenden GWL nachgewiesen (GCI 1996). Außerdem sind es die einzigen Gebiete, die im Ergebnis der vorangegangenen Kalibrierung noch starke Abweichungen aufweisen. Für den Förderzustand Mai 1996 wurde dieser Einfluß untersucht und die Leckageraten näherungsweise quantifiziert.

Tabelle 4.5-05: Beschreibung der in Abbildung 4.5-04 ausgewiesenen Bereiche mit Basis-Leckagen.

Lagebeschreibung	Leckage-Faktor [*10 ⁻⁴ m/d]	Leckage - kalibriertes Abstromvolumen [m ³ /d]	Fläche [km ²]
WW Johannisthal, Galerie Königsheide	-7	-1.400	2
WW Johannisthal, Galerie Teltowkanal	-23	-12.000	5
Westlich vom WW Wuhlheide, Heber-West	-20	-1.900	1
Südlich Teltowkanal	-2	-4200	17
Adlershof	-10	-1200	2
Nordöstlich WW Erkner	+20	+1500	2

In der Gesamtbilanz wurden ca. 20.000 m³/d Abstrom über Leckage an der Modellbasis modelliert. Nur für den Bereich nordöstlich von Erkner wurde ein Zustrom angenommen. Die

Verteilung ist in Tabelle 4.5-05 aufgelistet und die zugehörigen Bereiche sind in Abbildung 4.5-04 gekennzeichnet. Im Vergleich zur Simulation ohne Basis-Leckage wurde für das Gesamtmodell eine Verbesserung nach dem mathematischen Kriterium (MQA) von 0,2847 auf 0,2315 erreicht. Die hauptsächlichen Änderungen waren im Bereich der Teltowgalerie zu verzeichnen. Hier wurde die Anpassung in der Differenz von 250 cm auf 200 cm korrigiert (Tab. 4.5-06.). Eine weitere Erhöhung des Abstromes verbesserte zwar die Abweichung im Zentrum der Absenkung, wirkte sich aber auch negativ auf die benachbarten Meßstellen aus. Zur vollständigen Anpassung an dieser Stelle reichte auch dieser Parameter nicht. Daher wird dieser Bereich im Kapitel Fehlerdiskussion noch einmal diskutiert.

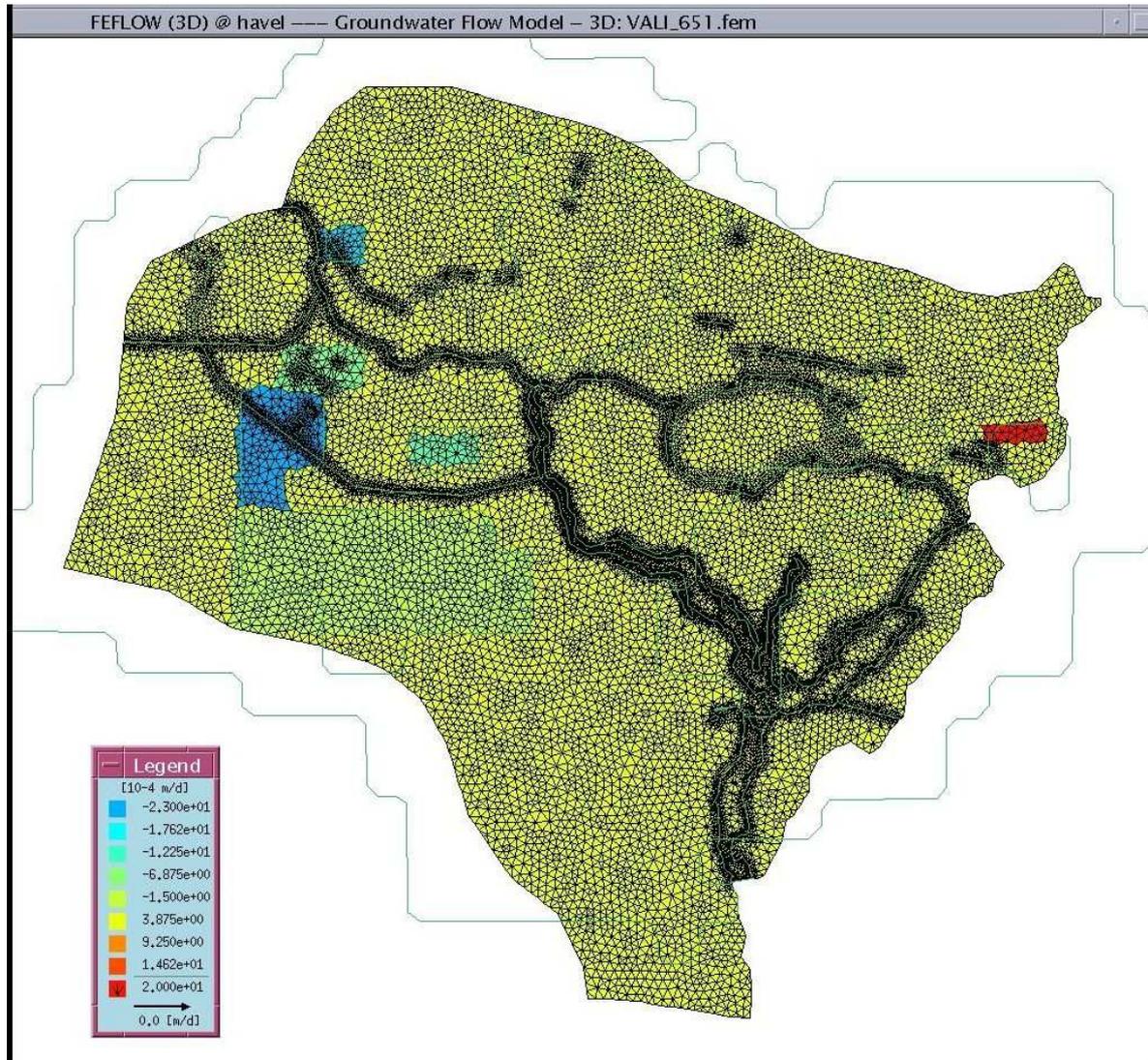


Abbildung 4.5-04: Flächen, die im FE-Netz mit Basis-Leckage belegt sind (s. Tab. 4.5-05)

Die Leckage westlich der Heber-Galerien des WW Wuhlheide liegt am westlichen Modellrand und sollte wegen des hohen Fehlerpotentials entlang der unsicheren Randbedingung nicht so hoch gewichtet werden. Im Gegensatz zu den o.g. Bereichen wird hier aber durch eine Erhöhung des in Tabelle 4.5-05 genannten Faktors bis auf $-80 \cdot 10^{-4} \text{ m/d}$ noch eine bessere Anpassung der Isolinien erreicht. Da nur eine Kontrollmeßstelle beeinflusst wird, ist die Auswirkung auf das Gesamtergebnis aber minimal.

Durch die Leckagen in den Bereichen südlich vom Teltowkanal, Adlershof und nordöstlich von Erkner wurden nur minimale Auswirkungen auf den Verlauf der Isohypsen erwirkt. Damit konnten sie in dieser Betrachtung vernachlässigt werden.

4.5.3.5 Sensitivität auf Veränderungen der Randbedingungen Grundwasserneubildung und Höhe Randzustrom (RB 1. Art)

Nachdem alle Parameter für die Modellierung auf der Grundlage des Förderzustandes Mai 1996 kalibriert wurden, mußte noch überprüft werden, ob die eingesetzten Mittelwerte der beiden festen Randbedingungen - Höhe Zustrom über die äußeren Ränder und GW-Neubildung - wirklich die besten Anpassungen darstellen. Die im Abschnitt 4.5.1 getätigten Annahmen können auf diesem Wege verifiziert werden. Schließlich ist es nicht selbstverständlich, daß zum Zustand der Förderung im Mai 1996 auch die über lange Zeiträume gemittelten Werte für die Randbedingungen wirksam werden. Mit dieser Methode kann gleichzeitig die Sensitivität des Modells gegenüber Änderungen dieser Randbedingungen festgestellt werden. Denn nur wenn das Modell sensitiv gegenüber Variationen dieser Randbedingungen ist, können Szenarien (Kap. 5.0), basierend auf solchen Veränderungen, überhaupt gerechnet werden. MCADA & BARROLL (2002) und HAUGH (2002) verweisen auf HILL (2000) bei der Diskussion der Parameter „sensitivity“ ihrer Modellanwendungen. Darunter wird die Stärke der Reaktion des Modells bei Parameteränderungen - in beiden Richtungen abweichend vom Mittelwert - verstanden. Es werden allerdings nur die Parameter: kf-Werte, Anisotropie und Speicherkoeffizient diskutiert, wobei in beiden Arbeiten die größte Sensitivität gegenüber den kf-Werten festgestellt wird. Diese Vorgehensweise wird hier für den Randzustrom und die GW-Neubildung übernommen. Die möglichen Schwankungsbreiten der Höhen im Randzustrom und der GW-Neubildung konnten aus den entsprechenden Zeitreihen der Meßstellen (Anlage A) abgeleitet werden. Drei Gruppen mit Abweichungen der Randbedingungen vom Mittelwert wurden gerechnet und in Tabelle 4.5-07, mit den Auswirkungen auf die Modellanpassung (MQA), zusammengefaßt:

- Gruppe I: Variation in der Höhe des Randzustromes in Meterschritten von 35 bis 39 mNN.
- Gruppe II: Variation der GW-Neubildung durch Multiplikation der Matrix mit dem Faktoren 0 bis 1,5 im Vergleich zum Mittelwert (1,0).
- Gruppe III: Gruppe I gekoppelt mit Gruppe II mit der Annahme, daß ein niedriger Zustrom im Einzugsgebiet durch geringe GW-Neubildung verursacht wird.

Im Ergebnis bestätigte die Gruppe I die richtige Annahme des mittleren Randzustromes von 37 mNN für die Kalibrierung. Abweichungen in beide Richtungen führten zu einer erheblich verringerten Modellanpassung (MQA).

Die Veränderungen der GW-Neubildung (Gruppe II) lassen sich dagegen nicht so einfach interpretieren. Eine geringfügig bessere Anpassung erbrachte die Verwendung der halbierten Mittelwerte (interpoliert über die Modellfläche sind das ca. 60% des Volumens unter Einsatz der Mittelwerte). Selbst ohne Einsatz von GW-Neubildung im Modell weicht die Modellanpassung nur geringfügig von der kalibrierten Variante ab. Dagegen führte die Verwendung der anderthalbfachen Werte (180% Volumen) zu einer erheblich schlechteren Modellanpassung. Eine Erklärung läßt sich aus den Meßwerten der Anlage A ableiten. Dort ist erkennbar, daß von Januar 94 bis Januar 96 ein GW-Hoch vorherrschte. Hohe Grundwasserstände, verursacht durch den Zustrom aus dem Norden des Einzugsgebietes (außerhalb des Modells), sollten daher zum

Zeitpunkt der Kalibrierung noch im Gebiet vorhanden sein. Die Meßstelle im Anstrom erfaßte für Mai 1996 auch einen Wert von ca. 37 mNN. Aber seit Oktober 1995 wurden unterdurchschnittliche Niederschläge aufgezeichnet, die geringe GW-Neubildung als Folge hatten. Diese Änderungen wirkten sich nur wenig zeitverzögert im Modellgebiet aus. Die bessere Modellanpassung bei Einsatz der halbierten Mittelwerte der GW-Neubildung kann somit durch die natürlichen Verhältnisse begründet werden. In der Modellbilanz werden die Änderungen in der Höhe der GW-Neubildung im wesentlichen durch den Anteil der Uferfiltrate (RB 3. Art) und nur untergeordnet durch den Rand-Zustrom kompensiert. Hier wird die in Kapitel 4.0.1.2 (Randbedingungen) geforderte „genügend große Entfernung zwischen Rand und dem Hauptinteressensgebiet der Berechnung“ bestätigt. Diese Abhängigkeit wird im Kapitel 5.0 (Szenarien) weiter diskutiert.

Bei Kopplung der beiden Einflüsse (Gruppe III) überwiegt der negative Effekt der Variation im Zustrom gegenüber der GW-Neubildung. Selbst die Kombination von verringertem Zustrom (36 mNN) und 0,5-facher GW-Neubildung führte zu einer schlechteren Modellanpassung, als der einzelne Faktor in Gruppe I. Allerdings wird, im Vergleich zum anderen Extrem (hoher Zustrom und GW-Neubildung), der Einfluß der Wichtung aus Gruppe II deutlich.

Im Scattergramm (Abb. 4.5-05) werden die Veränderungen an den einzelnen Meßstellen sichtbar. Durch eine Kopplung nach Gruppe III überlagern sich die Beträge der Wasserstandsänderungen. Auswirkungen der Veränderungen im Rand-Zustrom bleiben auf den landseitigen Anstrom der Brunnengalerien beschränkt. Wird die Höhe im Randzustrom beispielsweise um einen Meter verringert, sinken die simulierten Piezometerhöhen an den Meßstellen im Randbereich auch um diesen Betrag (Abb. 4.5-05, Beispiele A). Die Änderungen lassen sich bis hin zu den Brunnengalerien verfolgen, sind aber dort nur als Abweichungen im Dezimeterbereich wirksam. Dagegen wirken Veränderungen der GW-Neubildung gleichmäßig, aber vergleichsweise gering über das gesamte Modellgebiet mit Abweichungen im Dezimeterbereich. Die alleinige Wirkung von Veränderungen der GW-Neubildung läßt sich an den Meßstellen im Gebiet zwischen Spree und Dahme/Teltowkanal („Insellage“) erkennen (Abb. 4.5-05, Beispiele B). Zusammenfassend konnte bei gleichbleibender GW-Förderung die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Abweichungen der beiden Randbedingungen vom Mittelwert gezeigt werden.

4.5.4 Zusammenfassung

Mit der Kalibrierung der o.g. Randbedingungen sind die Möglichkeiten zur Modellanpassung ausgeschöpft, die in den Modellannahmen vorgesehen waren. Die aus Mittelwerten resultierenden Festlegungen der äußeren Randbedingungen und der GW-Neubildung wurden bestätigt.

Bei den zur Kalibrierung genutzten Randbedingungen erwies sich der Transferfaktor (RB 3. Art) als wichtigste Größe. Nach erfolgreicher Diskretisierung der transferwirksamen Bereiche ergab die abschnittsweise Zuweisung des Transferfaktors (Tab. 4.5-04, Verteilung A/B) die beste Modellanpassung.

Damit ist es mit dieser Methodik möglich, die Uferfiltratanteile der Brunnengalerien für den jeweiligen Förderzustand näher einzugrenzen. Diese unterscheiden sich im einzelnen wesentlich von den Anteilen unter Verwendung einheitlicher Transferfaktoren (Tab. 4.5-04). Darin liegt aber auch der Nachteil dieser Vorgehensweise begründet. Die verwendeten Transferfaktoren und

auch schon die Einteilung der dem Einzugsgebiet angepaßten Gewässerabschnitte sind für jede Änderung des Förderzustandes und aller anderen Randbedingungen neu zu kalibrieren.

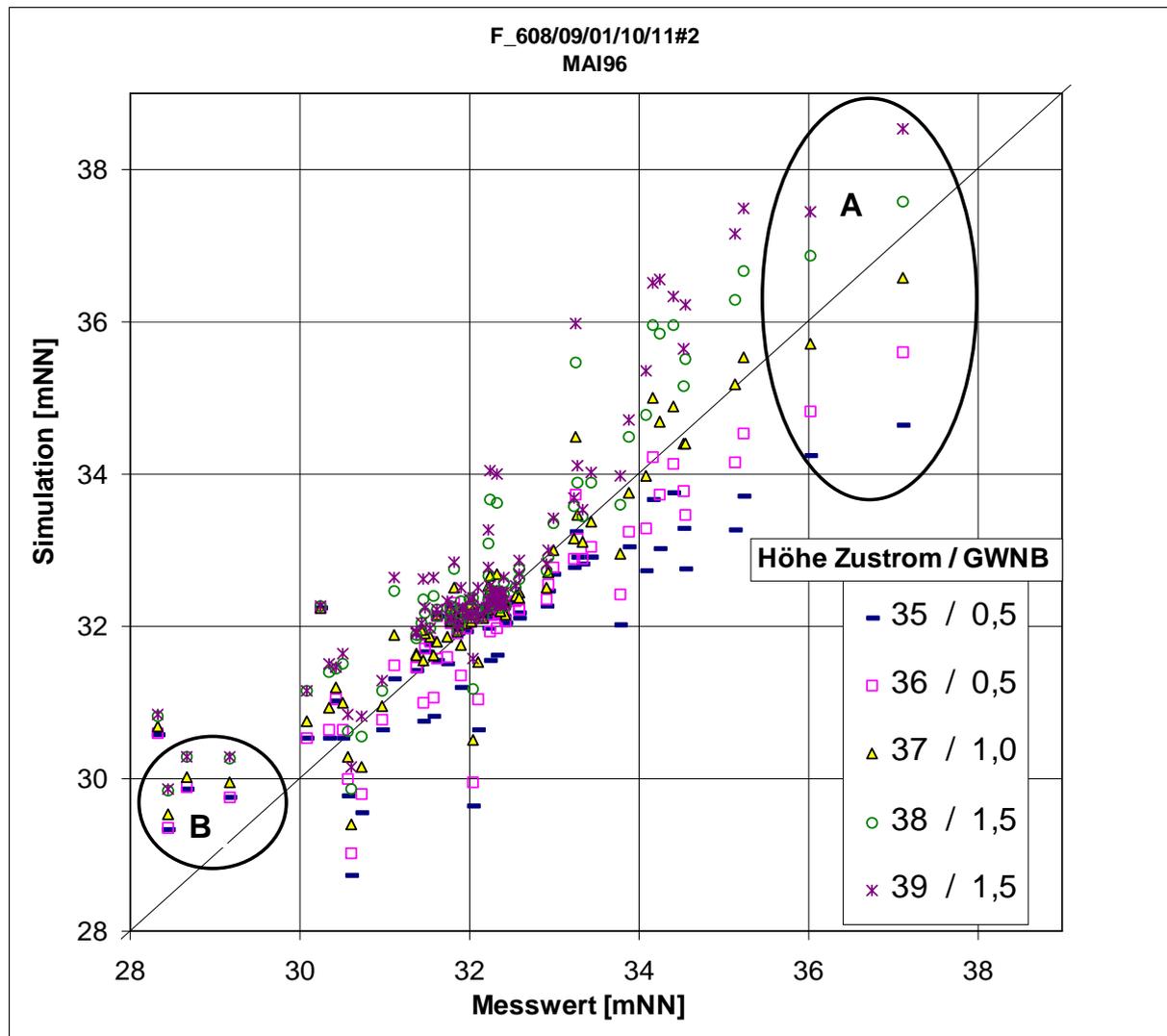


Abbildung 4.5-05: Scattergramm, das die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Änderungen in der Höhe des Randzustromes [mNN] und der GW-Neubildung [X-fache der Mittelwerte] verdeutlicht (s. Tab.4.5-07 Gruppe III). Die im Ergebnis der Kalibrierung simulierten Werte werden durch Dreiecke dargestellt.

A: Beispiele für Reaktion des GW-Spiegels vorrangig auf Änderung in der Höhe des Zustroms.
 B: Beispiele für Reaktion des GW-Spiegels ausschließlich auf Änderung der Höhe der GW-Neubildung.
 Die meisten Meßstellen zeigen eine Mischreaktion.

Somit ist diese spezielle Anpassung nicht zu validieren und auch nicht auf die Simulation von Szenarien anwendbar. In Hinsicht auf die weitere Verwendung des Modells zur Simulation von Szenarien und nach Auswertung aller Schritte der Kalibrierung kommt der **Transferfaktor von $0,5 \text{ d}^{-1}$** für das gesamte Modellgebiet zur Anwendung. Dies entspricht der besten Anpassung im Bereich des Modellschwerpunktes um den Müggelsee. Die resultierenden Abweichungen im Einzugs des WW Johannisthal werden im folgenden mit den übrigen Modellabweichungen diskutiert.

Die kalibrierten Werte der Basis-Leckagen sind als Versuch anzusehen, einen möglichen Austausch über die Modellbasis zu quantifizieren und die Sensitivität des Modells hinsichtlich

dieses Parameters zu testen. Im Ergebnis können lokale Einflüsse durch Austausch entlang der Modellbasis simuliert werden. Entscheidende Auswirkungen sind aber nur im Bereich des WW Johannisthal zu verzeichnen, da die Brunnengalerien genau über dem hydraulischen Fenster liegen. Das Modellergebnis wird durch starke Beeinflussung einzelner Kontrollmeßstellen, in Hinsicht auf die MQA, verbessert. Allerdings besteht hier der gleiche Nachteil wie bei Verwendung der optimierten Transferfaktoren. Die Leckagemengen variieren besonders mit Änderung der Fördermengen. Damit sind diese Angaben nicht zu validieren und somit auch nicht auf die Simulation von Szenarien anwendbar. Somit wurde das Modell **ohne Basis-Leckage** kalibriert.

Die Problematik um den sensiblen Bereich entlang der Teltow-Galerie wird bei der Simulation von Szenarien ohnehin entschärft, da diese Galerie dann nicht mehr fördert.

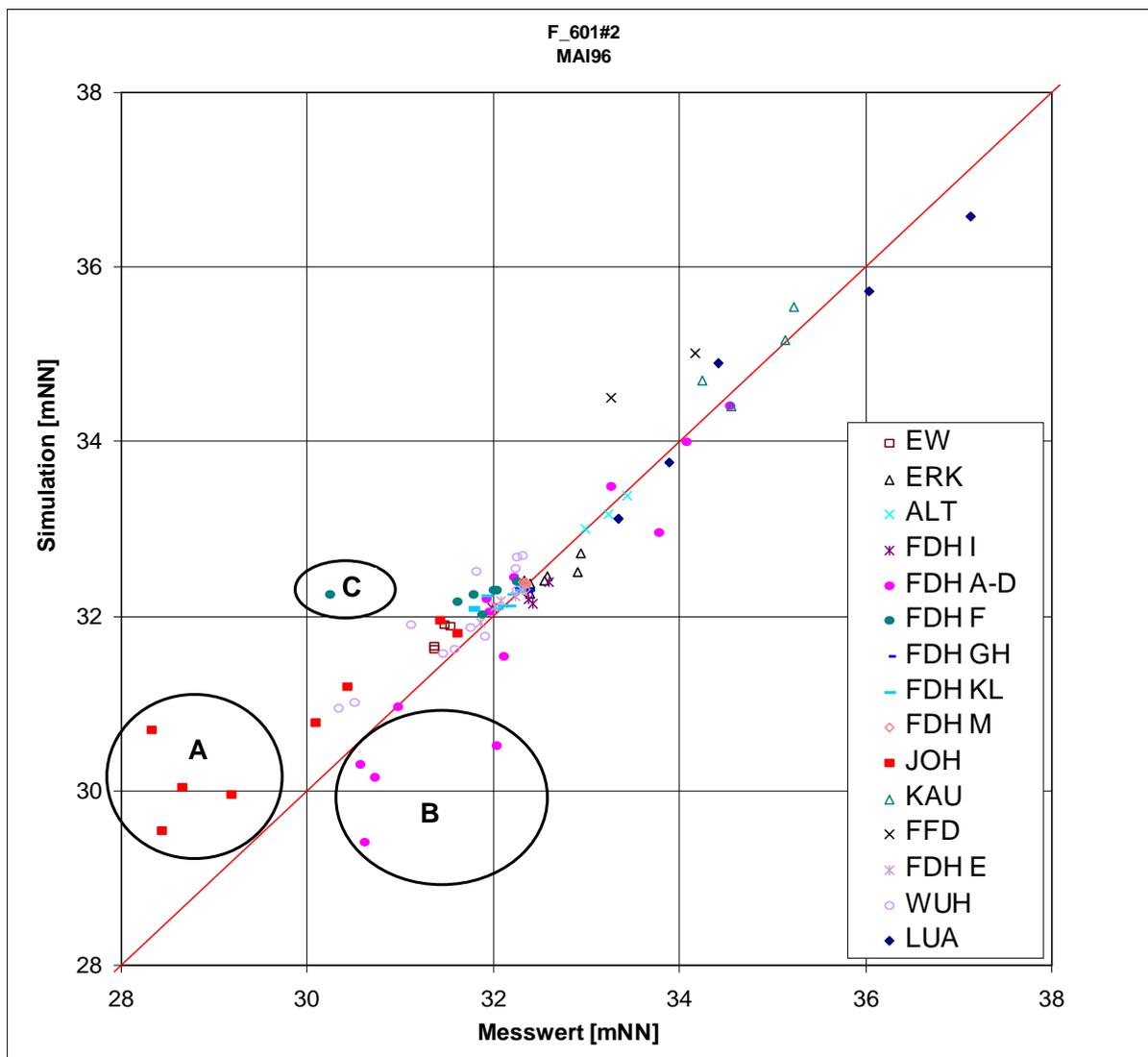


Abbildung 4.5-06: Scattergramm für das kalibrierte Modell (MQA: 0,2847). Die Kontrollmeßstellen sind den einzelnen Galerien zugeordnet und drei Gruppen von auffälligen Abweichungen sind markiert:

A: Extreme Abweichungen entlang der Teltowgalerie des WW Johannisthal

B: Starke Abweichungen entlang der Galerie B des WW Friedrichshagen

C: Einzige Meßstelle (Kp 115) mit extremer Abweichung entlang Galerie F des WW Friedrichshagen

Die als Resultat der Kalibrierung simulierten Wasserstände sind in Abbildung 4.5-07 dargestellt. Die Gesamtbilanzen und Anteile der Brunnengalerien sind in Tabelle 4.5-04 (Spalte „Transfer 0,5 d⁻¹“) zusammengefaßt. Die maximalen Abweichungen der simulierten GW-Stände gegenüber den Meßwerten in Bereichen der Brunnengalerien werden in Tab. 4.5-06 dargestellt. Im zugehörigen Scattergramm (Abb. 4.5-06) wird zusätzlich die Zuordnung der Kontrollmeßstellen zu den Brunnengalerien verdeutlicht. Mit (A,B,C) sind jeweils die Problembereiche mit verbleibenden hohen Abweichungen gekennzeichnet und werden in der Fehlerdiskussion erläutert.

Tabelle 4.5-06: Maximale Abweichungen der simulierten GW-Stände im kalibrierten Modell (Zustand Mai 1996) gegenüber den Meßwerten (Mai 1996) in fassungsnahen und -fernen Bereichen der Brunnengalerien.

Wasserwerk	Galerie	Maximale Abweichung Modell gegenüber Meßwerten [cm]			
		Fassungsnah (bis 500 m)		Fassungsfern (500 bis 2000 m)	
		Leckagen		Leckagen	
		ohne	mit	ohne	mit
Wuhlheide	Heber-West	+70		+100	
	Heber-Ost	+/-10		+/-10	
	UWM	+50		+30	
Johannisthal	Teltowkanal	(A) +250	+200	+/-20	+/-20
	Neue Königsheide	+80	+80	+40	+60
Kaulsdorf	Gesamt	+20		+40	
Friedrichshagen	A	+/-10		+/-10	
	B/C West, D	+/-10		+20	
	B Zentral/Ost	(B) -150		-100 (im Anstrom von NE)	
	C Zentral/Ost	-50		kein Wert, da direkter Einfluß Galerie B	
	E	+20		+/-10	
	F	(C) +200 (ein Meßwert Kp 115)		+/-10	
	G bis M	+30		+/-10	

Bemerkung: maximale Abweichungen (A,B,C) werden im Scattergramm (Abbildung 4.5-06) durch Kontrollmeßstellen belegt.

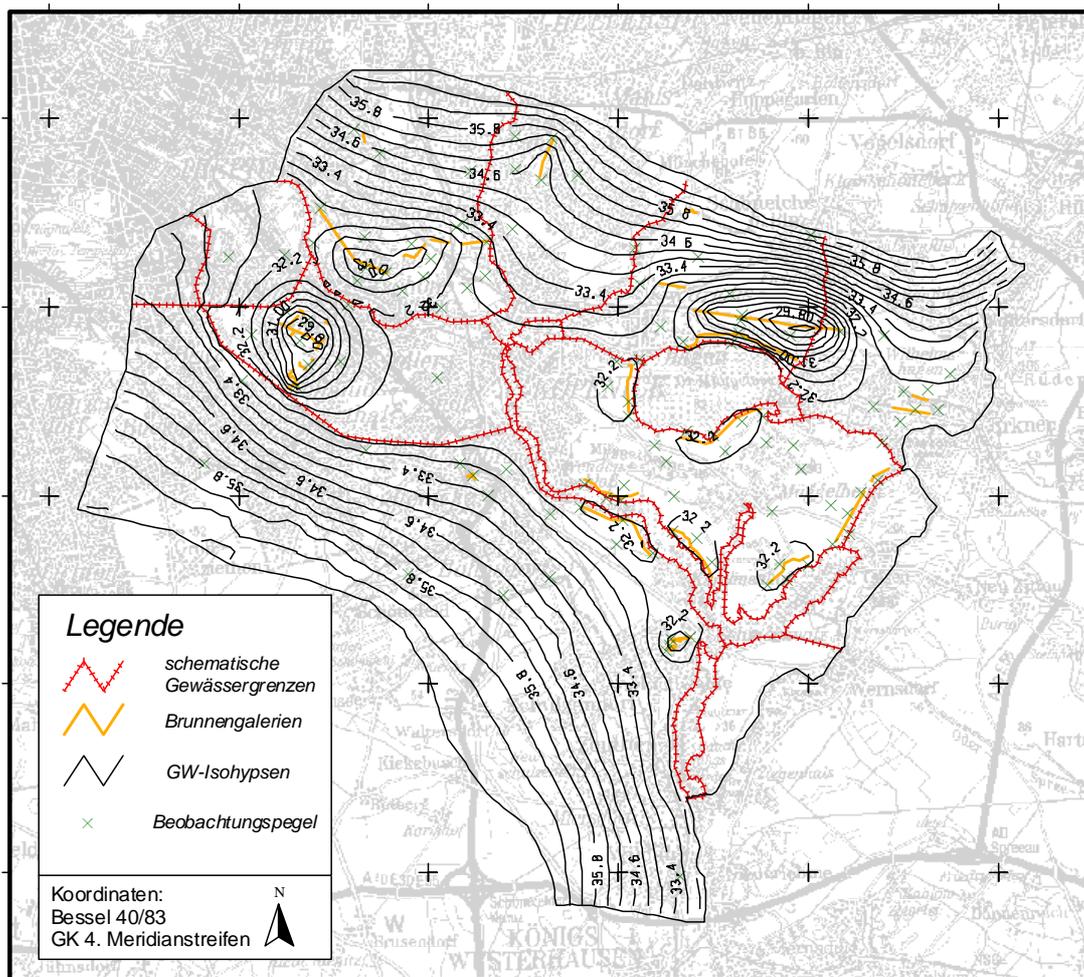


Abbildung 4.5-07: Isolinienplan der mit dem kalibrierten Modell simulierten Wasserstände (mNN).

4.5.4.1 Fehlerdiskussion

Mit den erreichten Genauigkeiten (Tab 4.5-06) liegt das Modell im Rahmen der erwarteten Genauigkeiten. Extreme Abweichungen im Meterbereich sind nur noch an drei Brunnengalerien zu verzeichnen. Sie sind in Tabelle 4.5-06 und Abbildung 4.5-06 mit (A, B, C) gekennzeichnet.

Bereich A: Wasserwerk Johannisthal - Teltowgalerie

Im gemeinsamen Absenktrichter der beiden Galerien des WW Johannisthal wird die Absenkung im Bereich der Teltowgalerie ca. 250 cm zu hoch simuliert. Ein Fehler aufgrund der Galerielänge (Modellannahme Punkt 3) wird ausgeschlossen, da die Anordnung der Brunnen räumlich sehr konzentriert ist. Der Versuch, den Transferfaktor entlang des Teltowkanals zu minimieren, erbrachte eine Verbesserung um ca. 100 cm. Auch ein möglicher Abstrom über die Modellbasis erbringt nur zusätzliche ca. 50 cm Verbesserung. Damit waren die Möglichkeiten der Kalibrierung erschöpft. In letzter Konsequenz wurden die kf-Werte im Bereich entlang der Teltowgalerie von $5,0 \cdot 10^{-4}$ m/s auf $0,5 \cdot 10^{-4}$ m/s verringert. Der kf-Wert in diesem Bereich ist ohnehin etwas geringer als in der Umgebung der Brunnengalerie. Diese zufällige Wahl in der Veränderung der kf-Werte reduzierten die maximale Abweichung auf 100 cm! Die MQA des Gesamtmodells verringert sich um 0,1. Unter Ausschluß anderer Fehlergrößen resultiert eine

ungenügende Auflösung des hydrogeologischen Modells für diesen Bereich als Ursache. Aus der Methodik zur Erstellung des hydrogeologischen Modells könnte resultieren, daß der dort gemittelte Wert höher ist als ein kleinräumiges Auftreten an der Galerie.

Bereich B: Wasserwerk Friedrichshagen - Galerie B

Im Ostteil der Galerie werden bis zu 150 cm zu tiefe Absenkungen simuliert. Hier ist eine Kombination von zwei Fehlern wahrscheinlich. Einerseits entsteht der Fehler aufgrund der Modellannahme Punkt 3 - also der Interpolation der Gesamtförderung über die Galerielänge. Damit verschiebt sich das Zentrum der Absenkung. Andererseits wurde entlang der mittleren und östlichen Galerieanteile der k_f -Wert etwas höher angenommen als in der Umgebung. So ist ein ähnlicher Fall wie an der Teltowgalerie möglich. Der an der Galerie B gemittelte Wert kann niedriger sein als der tatsächliche Wert entlang der Galerie. Somit wird dort eine tiefere Absenkung simuliert.

Bereich C: Wasserwerk Friedrichshagen - Galerie F

Hier ist der Meßwert an nur einer Meßstelle im Zentrum der Galerie (Kp 115) 200 cm niedriger als der simulierte Wasserstand. Eine Erklärung wird erschwert, denn selbst auf dem Isolinienplan der BWB für die Stichtagsmessung Mai 1996 (HYDROGEOLOGIE GMBH, 1996), wird diese Meßstelle angegeben, aber beim Zeichnen der Isolinien nicht berücksichtigt.

Aus den Gegebenheiten erscheint eine Kombination von mehreren Fehlerquellen wahrscheinlich. Naheliegend ist ein Fehler an der Meßstelle selbst, denn die Zeitreihen weisen fortlaufend zu niedrige Meßwerte auf. Laut Unterlagen ist sie im HGWL verfiltert. Sollte diese Zuordnung falsch sein, könnte dies die Druckunterschiede erklären. Möglich ist auch ein falscher Bezugspunkt, so daß der gemessene Wasserstand bei der Umrechnung auf Meereshöhe verfälscht wird.

Den Fehler aufgrund der Modellannahme Punkt 3 anzunehmen, erscheint unwahrscheinlich, da das modellierte Zentrum der Absenkung mit dem auf dem Isolinienplan übereinstimmt. Trotzdem könnten einige Brunnen lokal verstärkt gefördert haben. Wenn dann zusätzlich noch eine kleinräumige Einlagerung von Geschiebemergel angenommen wird, läßt sich auch dadurch diese Abweichung erklären. Linsen von Geschiebemergel in geringer Ausdehnung wurden im hydrogeologischen Modell nicht berücksichtigt. Der mittlere k_f -Wert in dieser Problemzone ist sogar noch etwas höher als in der Umgebung. Somit konnte das Modell diese extreme lokale Absenkung nicht simulieren.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die wenigen extremen Modellabweichungen durch eine ungünstige Kopplung von Fehlern entstehen. Diese sind meistens auf die Modellannahmen zurückzuführen und waren daher zu erwarten. Dabei spielt die Modellannahme Punkt 3 eine geringere Rolle als die Auflösung der hydrogeologischen Strukturen. Gerade an Schlüsselpositionen, wie kleinräumigen Absenkungen entlang der Brunnengalerien, ist die Geologie nicht hoch genug auflösend. Da dies aber auch nicht das Ziel der Modellierung war, ist die Modellanpassung im Ergebnis der Kalibrierung als erfolgreich einzustufen.

Tabelle 4.5-07: Sensitivität des Modells auf Variation der Randbedingungen Randzustrom, GW-Neubildung (GWNB) und deren Kopplung - als Gruppe I bis III. Dargestellt sind die Auswirkungen der veränderten GW-Neubildung und der Höhe des Randzustromes auf die Modellanpassung (MQA) und die Bilanzanteile für das Gesamtmodell (Fördermenge (FM), Volumenstrom am Rand, Volumenstrom Uferfiltrat (UF) und Prozentualer Anteil UF an FM).

Gruppe	Parameter Variation	Nummer Modellauf	MQA (Modell-anpassung)	GW-Neubildung Faktor	[m ³ /d]	Höhe Rand-Zustrom [mNN]	Fördermenge (FM) [m ³ /d]	Rand-Zustrom [m ³ /d]	Uferfiltrat [m ³ /d]	Anteil Uferfiltrat an FM [%]
I	Höhe	604	0,5488	1	101.285	35	213.488	47.907	107.375	50,30
	Rand-	605	0,3509	1	101.285	36	213.488	62.549	100.509	47,08
	Zustrom	601	0,2847	1	101.285	37	213.488	79.170	93.878	43,97
	(head)	606	0,3521	1	101.285	38	213.488	96.381	87.814	41,13
		607	0,5551	1	101.285	39	213.488	114.103	82.715	38,74
II	Höhe	612	0,4157	1,5	182.507	37	213.488	60.118	73.984	34,66
	GWNB	601	0,2847	1	101.285	37	213.488	79.170	93.878	43,97
		613	0,2637	0,5	61.395	37	213.488	92.141	105.275	49,31
		614	0,2992	0	0	37	213.488	111.040	128.273	60,08
III	Höhe	608	0,6243	0,5	61.395	35	213.488	58.926	120.283	56,34
	Rand-	609	0,3800	0,5	61.395	36	213.488	75.234	112.654	52,77
	Zustrom	601	0,2847	1	101.285	37	213.488	79.170	93.878	43,97
	und	610	0,5718	1,5	182.507	38	213.488	75.155	69.561	32,58
	GWNB	611	0,8626	1,5	182.507	39	213.488	91.841	65.430	30,65

Bemerkungen:

Kursiv: Beste Modellanpassung

Fett: Kalibrierter Zustand

Rot: Veränderungen innerhalb einer Gruppe