

# Modellgestützte Bilanzierung der unterirdischen Wasserressourcen Berlins - die Grundwassersituation im weiteren Einzugsgebiet des Müggelsees

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum naturalium  
(Dr. rer. nat.)  
im Fach Geologie

eingereicht im  
Fachbereich Geowissenschaften  
der Freien Universität Berlin  
von

Dipl.-Geologe Matthias Zippel

Berlin 2005

## **Gutachter zur Schrift**

Modellgestützte Bilanzierung der unterirdischen Wasserressourcen Berlins – die Grundwassersituation im weiteren Einzugsgebiet des Müggelsees

vorgelegt von Matthias Zippel

1. Gutachter: Prof. Dr. Asaf Pekdeger  
Freie Universität Berlin  
Institut für Geologische Wissenschaften  
Fachbereich Geochemie, Hydrogeologie, Mineralogie
  
2. Gutachter: Prof. Dr. Gunnar Nützmann  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II  
Geographisches Institut

Datum der Disputation

19. Januar 2006

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>GEOGRAPHIE, HYDROGEOLOGIE UND WASSERWIRTSCHAFT</b>	<b>7</b>
2.1	GEOGRAPHIE	7
2.2	HYDROGEOLOGIE UND WASSERWIRTSCHAFT	8
<b>3.</b>	<b>HYDROGEOLOGISCHES MODELL</b>	<b>12</b>
3.1	AUFBAU DES HYDROGEOLOGISCHEN MODELLS	13
3.2	METHODIK DER MODELLENTWICKLUNG	15
3.2.1	Datenvergleichbarkeit	15
3.2.2	Bearbeitungsmethodik und Abbildungsgenauigkeit	16
3.2.3	Dateneingabe	17
3.3	ERGEBNISSE	19
3.3.1	Darstellung und Plausibilitätsprüfung	19
3.3.2	Struktur Modellraum	19
<b>4.</b>	<b>NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL</b>	<b>22</b>
4.1	MODELLGRUNDLAGEN	22
4.2	MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN	22
4.2.1	Anfangsbedingung	23
4.2.2	Randbedingungen	23
4.3	ÜBERGABE DER HYDROGEOLOGISCHEN STRUKTUREN UND PARAMETER AN FEFLOW	25
4.3.1	Festlegung der Modellgrundwasserleiter in FEFLOW	25
4.3.2	Zuweisung der kf-Werte und Ableitung der effektiven Porosität	25
4.3.3	Parametersensitivität	29
4.4	MODELLGRENZEN, RAND- UND ANFANGSBEDINGUNGEN UND NETZAUFBAU	31
4.4.1	Ableitung der Modellgrenzen und Randbedingungen nach hydrogeologischen Aspekten	31
4.4.2	Modellparameter und Quell-/Senkenterme	35
4.4.3	Netzaufbau	37

4.5	KALIBRIEREN DES STATIONÄREN MODELLS	38
4.5.1	Festlegung des zu kalibrierenden Zustandes und Modellannahmen	38
4.5.1.1	Modellannahmen	40
4.5.1.2	Erwartete Genauigkeiten	41
4.5.2	Gütekriterien	42
4.5.2.1	Mathematisches Kriterium	42
4.5.2.2	Isolinienpläne	42
4.5.2.3	Kriterium Bilanz	43
4.5.3	Kalibrierung	45
4.5.3.1	Festlegen der äußeren Randbedingungen	45
4.5.3.2	Netzdichte und Transferrandbedingung	46
4.5.3.3	Variation der Transferfaktoren	49
4.5.3.4	Variation von Zu- und Abstrom an der Basis	52
4.5.3.5	Sensitivität auf Veränderungen der Randbedingungen Grundwasserneubildung und Höhe Randzustrom	55
4.5.4	Zusammenfassung	56
4.5.4.1	Fehlerdiskussion	60
4.6	VALIDIEREN	63
4.6.1	Stationäre Zustände	64
4.6.2	Modellsensitivität	69
4.6.2.1	Transfer	69
4.6.2.2	Randzustrom	69
4.6.3	Instationäre Zustände	70
4.6.4	Ergebnisse	72
<b>5.</b>	<b>SZENARIEN</b>	<b>76</b>
5.1	WASSERWIRTSCHAFTLICH BEGRÜNDETE SZENARIEN	76
5.2	HYDROLOGISCH BEGRÜNDETE SZENARIEN	89
<b>6.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNGEN</b>	<b>103</b>
<b>7.</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>109</b>
	Anhang	
	Danksagung	
	Lebenslauf	

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.0-01: Darstellung des Betrachtungsgebietes im Südosten Berlins und dem angrenzenden Land Brandenburg.....	7
Abbildung 2.0-02: Hydrogeologischer Schnitt der quartären und tertiären Grundwasserleiter .....	10
Abbildung 2.0-03: Standorte der Berliner- und ausgewählter Brandenburger Wasserwerke sowie deren Wasserschutzgebiete .....	11
Abbildung 3.0-01: Flächen des Modellgebietes und des hydrogeologischen Modells sowie die Lage der Rasterpunkte zur Regionalisierung der hydrogeologischen Informationen. ....	13
Abbildung 3.0-02: Darstellung der Unterkanten der kartierten Einheiten und deren Verteilung über die zugeordneten Horizonte .....	20
Abbildung 3.0-03: Teufenlage der für die Simulation vervollständigten Modellbasis.....	21
Abbildung 4.3-01: Vertikale Verteilung der kf-Werte in einem beispielhaften N-S-Schnitt .....	27
Abbildung 4.3-02: Horizontale Verteilung der kf-Werte über das Modellgebiet innerhalb der Modellgrundwasserleiter .....	28
Abbildung 4.3-03: Verlauf der Grundwasserisohypsen bei einer Simulation der Wasserwerksförderung im Mai 1996 unter Verwendung der kf-Wert-Matrix. ....	29
Abbildung 4.3-04: Vergleich der Simulationsergebnisse mit einheitlichem kf-Wert und nach Einsatz des hydrogeologischen Modells, anhand der Förderung der B-Galerie des WW Friedrichshagen, im Mai 1996.....	30
Abbildung 4.4-01: Mächtigkeit des Modellraumes.....	31
Abbildung 4.4-02: Begrenzung des Modellgebietes mit Herleitung der Teilgrenzen und Lage der Brunnengalerien.....	32
Abbildung 4.4-03: Verteilung, Art und Höhe der äußeren und inneren Randbedingungen .....	34
Abbildung 4.4-04: Verteilung der GW-Neubildung .....	36
Abbildung 4.5-01a: Zeitliche Verteilung der Monatsmittelwerte der Fördermengen der Wasserwerke (ohne WW Friedrichshagen) im Zeitraum 1989-99. ....	39
Abbildung 4.5-01b: Zeitliche Verteilung der Monatsmittelwerte der Fördermengen der einzelnen Brunnengalerien des WW Friedrichshagen im Zeitraum 1989-99 .....	39
Abbildung 4.5-03: Gliederung der Uferbereiche in 74 Teilflächen zur kleinräumigen Anpassung der Transferfaktoren.....	52
Abbildung 4.5-04: Flächen, die im FE-Netz mit Basis-Leckage belegt sind .....	54
Abbildung 4.5-05: Scattergramm, das die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Änderungen in der Höhe des Randzustromes und der GW-Neubildung .....	57
Abbildung 4.5-06: Scattergramm für das kalibrierte Modell.....	58
Abbildung 4.5-07: Isolinienplan der mit dem kalibrierten Modell simulierten Wasserstände .....	60
Abbildung 4.6-01: Scattergramm mit dem Vergleich der zwei simulierten Varianten für den Zustand Mai 1989. ....	66

Abbildung 4.6-02: Scattergramm für den Zustand Mai 1999. ....	68
Abbildung 4.6-03: Jahresgang ausgewählter Kontrollmeßstellen für die instationäre Simulation .....	71
Abbildung 4.6-04: Scattergramm mit den Plots der extremen Förderzustände (Mai 1989 [60%] und Mai 1999) im Vergleich zum kalibrierten Zustand Mai 1996. ....	73
Abbildung 5.0-02: Basis-Szenarien 1-3 mit Auswirkungen von veränderter Fördermenge bei konstanten Randbedingungen .....	81
Abbildung 5.0-03: Basis-Szenarien mit der Differenz der Wasserstände bei abnehmender Fördermenge.....	82
Abbildung 5.0-04: Szenarien 4 & 5 mit den Auswirkungen von veränderten Fördermengen und –standorten, bei konstanten Randbedingungen, auf die GW-Flurabstände und die GW-Isohypsen.....	85
Abbildung 5.0-05: Detail-Szenarien A – C mit Auswirkungen auf die GW-Stromlinien der Nordgalerien des WW FDH durch veränderte Fördermenge und Förderstandorte bei konstanten Randbedingungen. ....	87
Abbildung 5.0-06: Szenario 6: GW-Isohypsen und GW-Flurabstände bei Simulation der GW-Strömung zum Zustand ohne GW-Entnahmen („natürliches Fließsystem“). ....	88
Abbildung 5.0-07: Bandbreite der möglichen mittleren globalen Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert.....	90
Abbildung 5.0-08: Differenzen der mittleren Jahressummen der Sickerwasserbildung zwischen dem Klimaszenario und dem „Ist-Zustand“ ..	91
Abbildung 5.0-09: Die simulierten hydrologischen Folgen von Referenzklima (1980-1990) und Klimaszenarium (2040-2050). ....	92
Abbildung 5.0-10: Prozentuale Anteile der aktuellen Evapotranspiration und Grundwasserneubildung am Gesamtwasserhaushalt an sechs Standorten in Brandenburg (40-jähriges Mittel), Simulationen mit fünf Klimaszenarien .....	92
Abbildung 5.0-11: Aktuelle Evapotranspiration und Grundwasserneubildung an sechs Standorten in Brandenburg (40-jähriges Mittel), Simulationen mit fünf Klimaszenarien .....	93
Abbildung 5.0-12: Szenarien 7 & 8 mit den Auswirkungen auf die GW-Flurabstände und die GW-Isohypsen durch veränderte Höhe des Randzustromes, bei gleicher Fördermenge und Höhe der GW-Neubildung .....	96
Abbildung 5.0-13: Szenarien 9 & 10 mit den Auswirkungen auf die GW-Flurabstände und die GW-Isohypsen durch veränderte Höhe der GW-Neubildung, bei gleicher Fördermenge und Höhe des Randzustromes von 37 mNN .....	98
Abbildung 5.0-14: Szenarien 11 & 12 mit den Auswirkungen auf die GW-Flurabstände und die GW-Isohypsen durch veränderte Höhe der GW-Neubildung und damit gekoppelter Höhe des Randzustromes bei gleicher Fördermenge. ....	99

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.0-01: Schematischer Überblick der Stratigraphie im Raum Berlin nach Kloos .....	9
Tabelle 3.0-01: Datengrundlagen, -quellen und -strukturen .....	14
Tabelle 3.0-02: In den Vorlagen verwendete stratigraphische Gliederungen und deren Abbildung auf die hier kartierten (Modell)Horizonte.....	18
Tabelle 4.3-01: Ableitung der zur Simulation genutzten kf-Werte aus den Literaturangaben.. .....	26
Tabelle 4.4-01: Die Filterstrecken der Wasserwerksbrunnen.....	35
Tabelle 4.5-01: Abschätzung der Geschwindigkeiten und Volumenströme im Zustrom von den Hochflächen unter Verwendung der Extremwerte.....	44
Tabelle 4.5-02: Entwicklung der Netzdichte im Verlauf der Kalibrierung. ....	47
Tabelle 4.5-03: Definition der Transfer wirksamen Uferbereiche im Modell.....	49
Tabelle 4.5-04: Vergleich der unterschiedlichen Transferfaktoren bei der Simulation ohne Basis-Leckage. ....	51
Tabelle 4.5-05: Beschreibung der in Abbildung 4.5-04 ausgewiesenen Bereiche mit Basis-Leckagen. ....	53
Tabelle 4.5-06: Maximale Abweichungen der simulierten GW-Stände im kalibrierten Modell (Zustand Mai 1996) gegenüber den Meßwerten (Mai 1996).....	59
Tabelle 4.5-07: Sensitivität des Modells auf Variation der Randbedingungen Randzustrom, GW-Neubildung und deren Kopplung. ....	62
Tabelle 4.6-01: Vergleich der Modellanpassungen der stationären Simulation verschiedener Förderzustände im Zeitraum 1989–1999.....	65
Tabelle 4.6-02: Vergleich der Modellanpassung bei Variation der Transferfaktoren.....	69
Tabelle 4.6-03: Variation in der Höhe des Randzustromes für den Förderzustand Mai 1999.. .....	69
Tabelle 4.6-04: Vergleich der Modellanpassung und der Bilanzen zwischen der stationären und instationären Simulation der Förderzustände Mai 1996 und Oktober 1996.....	70
Tabelle 4.6-05a: Vergleich der Förderzustände Mai 1996 und Mai 1999.....	74
Tabelle 4.6-05b: Vergleich der Förderzustände Mai 1989 [100%] und Mai 1989 [60%].....	75
Tabelle 5.0-01: Bilanzen der Förder(Basis)szenarien 1 bis 3 im Vergleich - basierend auf der Änderung der Fördermengen bei gleichzeitigen Betrieb aller Brunnengalerien. ....	78
Tabelle 5.0-02: Bilanzen der Förderszenarien 4 und 5 im Vergleich - basierend auf der Stilllegung von Brunnengalerien (veränderte Standorte) und Änderung der Fördermengen.....	84
Tabelle 5.0-03: Bilanzen der Szenarien im Vergleich - basierend auf der Änderung der klimatischen Randbedingungen bei konstanter Fördermenge und Betrieb aller Brunnengalerien .....	102

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
BWB	Berliner Wasserbetriebe	HK50	Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik 1 : 50.000
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	HYK50	Hydrogeologische Karte von Brandenburg 1 : 50.000
DGM	Digitales Geländemodell	IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Diss.	Dissertation	K	Kelvin (Grad)
DWD	Deutscher Wetterdienst	kf-Wert	Durchlässigkeitsbeiwert
EU-WRLL	EU Wasser Rahmen Richtlinie	km	Kilometer
EZ	Einzugsgebiet	l	Liter
FE	Finite Elemente	LGRB	Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
FM	Fördermenge(n)	LUA	Landes Umweltamt
FU	Freie Universität	LVA	Landesvermessungsamt
Gal.	(Brunnen)Galerie	m mm	Meter Millimeter
GK	Gauß-Krüger (Koordinatensystem)	MGWL	Modellgrundwasserleiter
GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufes	mNN	Meter über Normal Null
GOK	Gelände Oberkante	MQA	Mittlere quadratische Abweichung
GruWaSteuV	Grundwasser Steuerungsverordnung	RB	Randbedingung(en)
GW	Grundwasser	SenStadtUm	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie (Berlin)
GWBR	Grundwasserbeobachtungsrohr(e)	UF	Uferfiltrat
GWH	Grundwasserhemmer	WAB	(VEB) Wasser und Abwasserbehandlung
GWL	Grundwasserleiter	WW ALT ERK	Wasserwerk(e) Altglienicke Erkner
GWLK	Grundwasserleiterkomplex	EW FDH	Eichwalde Friedrichshagen
GWNB	Grundwasserneubildung	FRF JOH	Friedrichsfelde Johannisthal
HGM	Hydrogeologisches Modell	KAU WUH	Kaulsdorf Wuhlheide
HGWL	Hauptgrundwasserleiter	ZGI	Zentrales Geologisches Institut