

4.6.5 用水源

(1) パドマ川の水文および断面データ

ガンジス川はヒマラヤ山脈の南斜面に端を発する。インド盾状地を突き抜けた後、ガンジス川はラジャマハル丘陵とディナジュプル盾状地の間の多数の新断層に沿って東に向きを変える。川はゴダガリで「バ」国に入り、パドマ川と呼ばれる。ジャムナ川と合流するまでの延長は2,600km、流域面積は990,400km²でそのうち「バ」国内では38,880 km²となっている。ガンジス（パドマ）川の平均縦断水位勾配は5/100,000である。河床土砂の寸法は下流になるにしたがって小さくなり、ハーディング橋位置では、平均径が0.15mmとなっている。

川の平面形状は、蛇行河川と網状河川の間にあたり、時間的にも空間的にも変化する。蛇行曲がりの方向転換および網状帯の形状は、川に設置された護岸により制約を受けている。護岸は粘着性の材料や洗掘を防ぐ工作物で構築されているが、護岸の内側の材質は締固めの緩い砂やシルトであり、非常に洗掘されやすい。

パドマ川の水文および断面データは、BWDB がハーディング橋位置で測定したものである。河川断面測定線である RMG-13 の位置を Figure I-4-6-4 に示す。



Figure I-4-6-4 ベラマラ地点およびパドマ川

Figure I-4-6-5 は、1976 年から 2006 年のハーディング橋位置での水位を示す。

通常、パドマ川の水位は、6月後半から上昇を見せ、この間に土砂の堆積の増加を伴いながら8月、9月に最高水位を示す。11月中旬以後、パドマ川の水位は低下し始め、通常この間の土砂の堆積は非常に少ない。

ハーディング橋での水位は以下の通りである。

LLWL = EL+4.22 m

LWL = EL+5.47 m*

MWL = EL+8.74 m*

HWL = EL+13.63 m*

HHWL = EL+15.19 m

(*:1976年から2006年における平均値)

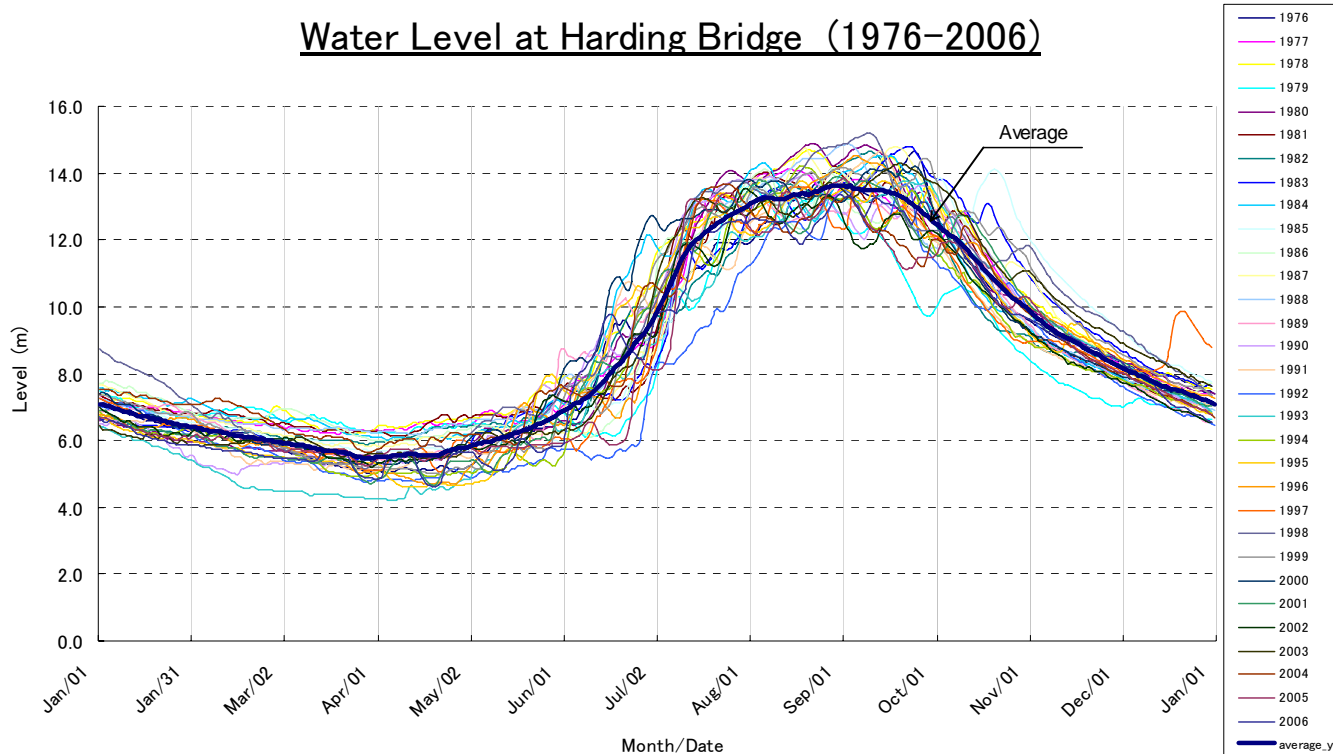


Figure I-4-6-5 ハーディング橋での水位

Figure I-4-6-6 と Figure I-4-6-7 は、ハーディング橋位置における月別の最小流量を示す。ハーディング橋におけるパドマ川の最小流量は次の通りである。

最小流量 : $Q_{min}=183m^3/sec$ (Mar. 1997)

平均最小流量 : $Q_{min}=709m^3/sec$ (Apr.)

Monthly Variation of Discharge at Harding Bridge (min.)

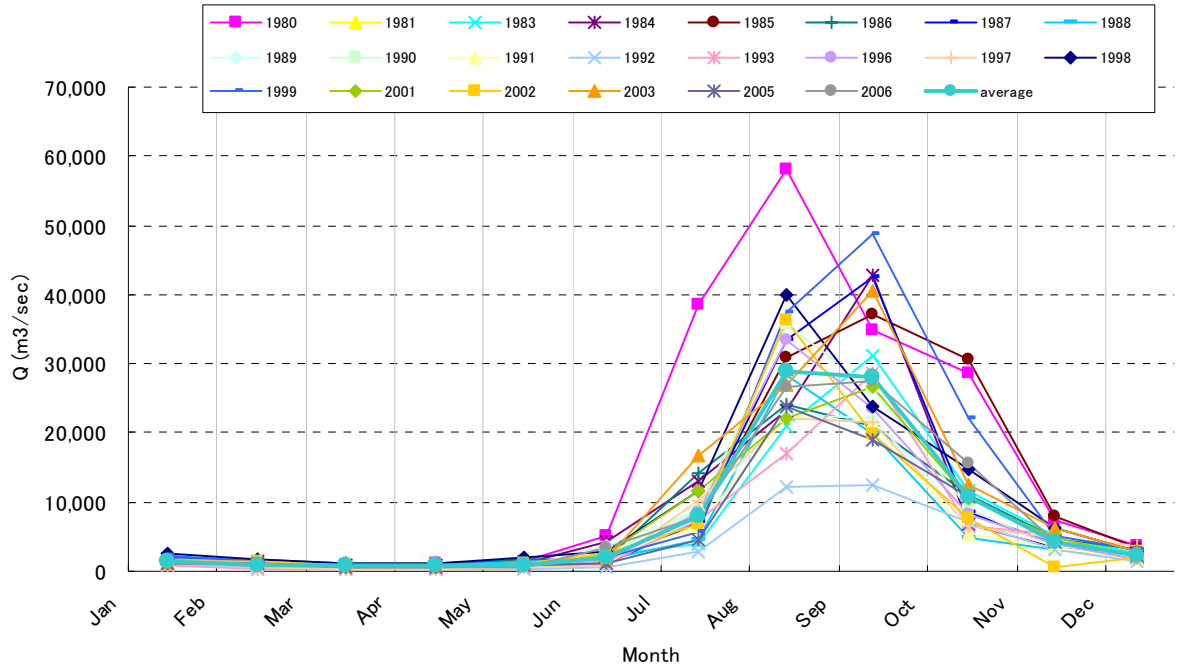


Figure I-4-6-6 ハーディング橋での月別最低流量

Monthly Variation of Discharge at Harding Bridge in dry season (min.)

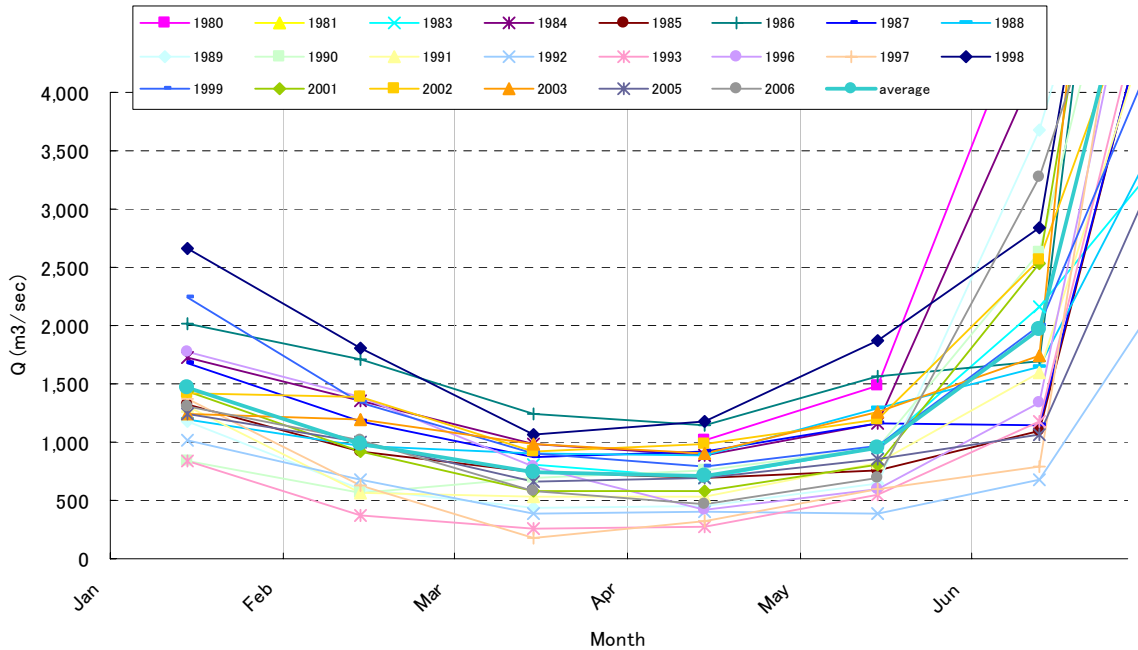


Figure I-4-6-7 ハーディング橋での乾季の月別最低流量

Figure I-4-6-8 は、ハーディング橋位置における流速を示す。2007 年のハーディング橋位置におけるパドマ川の流速は次の通りである。

最大流速 : $V_{max}=3.62\text{m/sec}$

最小流速 : $V_{min}=0.32\text{m/sec}$

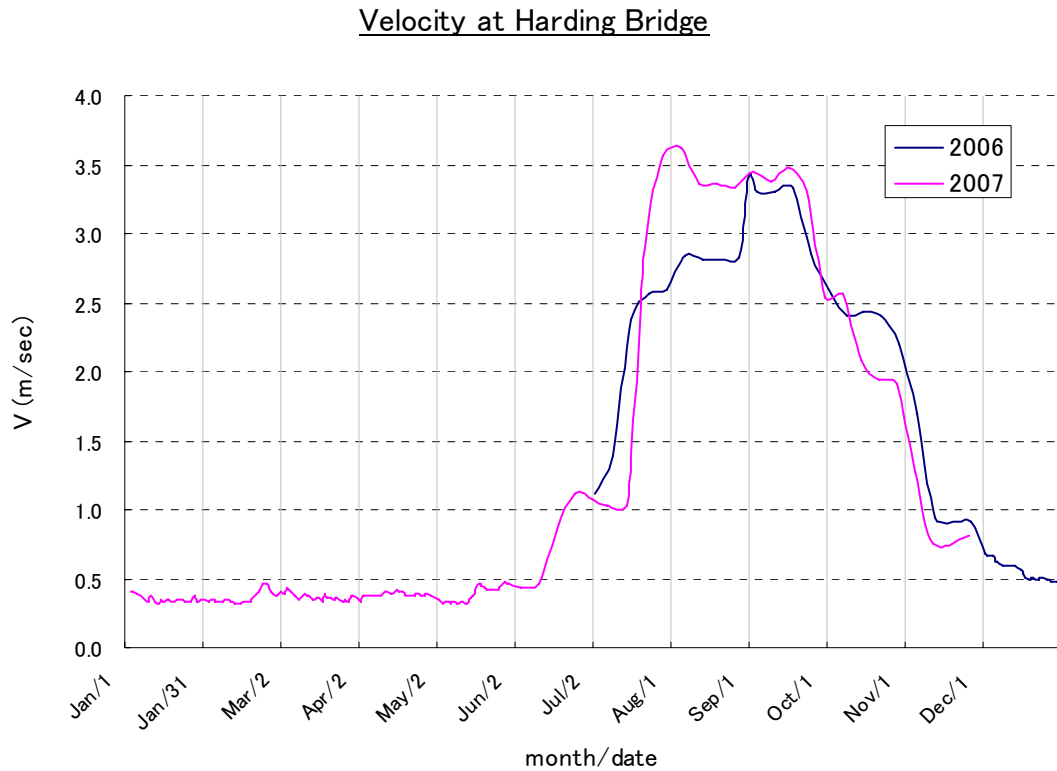


Figure I-4-6-8 ハーディング橋での流速

Figure I-4-6-9 は、パドマ川の RMG-13 断面の川床高さを示す。川床高さは、ほぼ年に一回乾季に測定されている。

Cross Section of RMG13 (1992/2-2006/4)

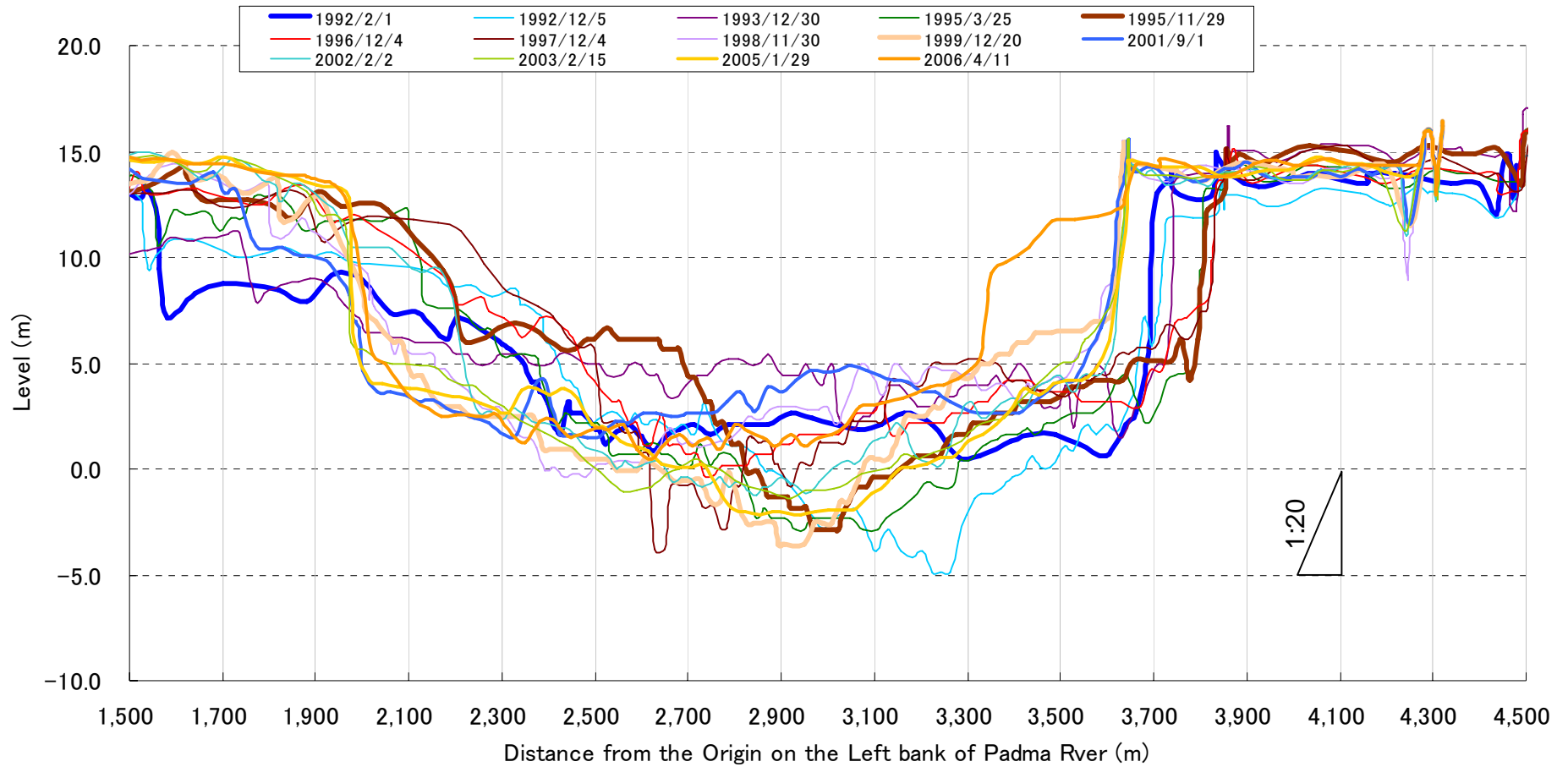


Figure I-4-6-9 RMG-13 断面でのパドマ川河床断面

(2) 地下水調査

冷却塔の補給水として地下水の汲み上げが考えられることから、サイトにおける帯水層の構成状況の現況情報を得るために、また長期にわたる地下水の連続汲み上げによる既存の井戸への影響を評価するために、地下水調査・解析を実施した。

1) 地下水調査

深さ 100mの揚水井 1 本および観測井 12 本からなる地下水調査を実施した。

地下水調査には以下の項目が含まれる。

- 試験掘削および解析
- 揚水井、観測井の掘削、設定
- 電気検層
- 揚水試験（72 時間連続揚水試験）
- 試験結果の評価

揚水井、観測井の配置図を Figure I-4-6-10 に示す。



Figure I-4-6-10 揚水井、観測井の配置

サイト一帯の帯水層は、揚水井および観測井から掘り出した資料土の篩い分け試験および電気検層により求めた。

揚水ポンプの容量は最大 2.0 ft³/sec (=3.40m³/min=204m³/hr)で、揚水井の汲み上げ実績は 159.0 – 163.3 m³/hr であった。揚水井および観測井それぞれにおける帯水層の断面諸元を Table I-4-6-2 に示す。

Table I-4-6-2 帯水層の断面諸元

井戸 ID	半帯水層深さ (GL -m)	上部帯水層深さ (GL -m)	帯水層主要部深さ (GL -m)	掘削深さ (GL -m)	井戸ケーシング高 (GL +m)	井戸深さ (GL -m)	スクリーン深さ (GL -m)	汲み上げ量
PW-01	6.09	36.58	掘削深さ 以深	92.68	0.46	86.91	42.71–85.39	159.00-163.30 (m ³ /h)
TTW/ OW-01	12.19	36.58	同上	100.00	0.305	83.84	79.27–82.32	36 l/s
OW-02	9.14	42.68	同上	100.00	0.305	84.15	79.58–82.63	36 l/s
OW-03	6.09	30.48	同上	100.61	0.305	50.00	45.43–48.48	32 l/s
OW-04	6.09	48.78	同上	101.22	0.305	77.75	73.18–76.23	37 l/s
OW-05	3.04	27.43	同上	100.61	0.305	83.84	79.27–82.32	36 l/s
OW-06	12.19	36.58	同上	100.00	0.305	76.22	71.65–74.70	36 l/s
OW-07	6.09	42.68	同上	100.61	0.305	76.83	71.65–74.70	31 l/s
OW-08	6.09	36.58	同上	100.61	0.305	77.75	73.18–76.23	32 l/s
OW-09	6.09	24.39	同上	100.00	0.305	76.22	71.65–74.70	36 l/s
OW-10	6.09	42.68	同上	100.61	0.305	74.70	70.13–73.18	37 l/s
OW-11	6.09	36.58	同上	100.00	0.305	79.27	74.70–77.75	35 l/s
OW-12	6.09	42.68	同上	100.00	0.305	79.88	75.31–78.36	38 l/s

南北および東西方向の帯水層縦断面図をそれぞれ Figure I-4-6-11, 12 に示す。

断面図から、掘削深度の 100m の範囲において水理特性上 2 層に分かれることが分かる。上層の半帯水層が表層で、粘性土、シルト質粘性土および砂質粘性土からなる。この層厚は平均約 6.5m(3m-12m)である。帯水層は上層の半帯水層の下に位置し掘削深度まで連続している。帯水層の上層は細砂からなり平均約 40m(25m-55m)の深度まで連続している。帯水層の主要部は中庸・細砂および部分的に粗砂を含む細・中庸砂の互層となっており平均約 90m(80m-100m 以深)の深度まで連続しており、その下は礫層となっている。

帯水層の内部や隣接する土層に粘性土やシルトがあると、帯水層の砂、礫中の間隙水

圧の低下が粘性土、シルト層からの低速な排水をもたらす。低下した間隙水圧は粘性土、シルト層の支持力低下をもたらす。粘性土、シルト層は圧縮しやすい性質をもつため、圧密され、地盤面の低下として顕在化する。けれども、地質学的に、サイト一帯は巨大な蛇行河川として著名なガンジス川の点状砂州にあたる。堆積学では、アレンの蛇行河川モデル（1970）が良く知られている。アレンの堆積相モデルは、蛇行河川の点状砂州形成過程は次のように進行することを示している。底面では礫が堆積し、順に粗砂、中庸砂、細砂、極細砂が堆積していく。粘性土層は表層に堆積するのみである。断面図は、典型的なこの蛇行河川モデルの堆積相を示している。よって、サイト一帯での地下水汲み上げによる地盤沈下は考えられない。

揚水井の断面を Figure I-4-6-13 に示す。また、揚水試験の結果（揚水井および観測井水位低下量の記録）を Figure I-4-6-14 に示す。

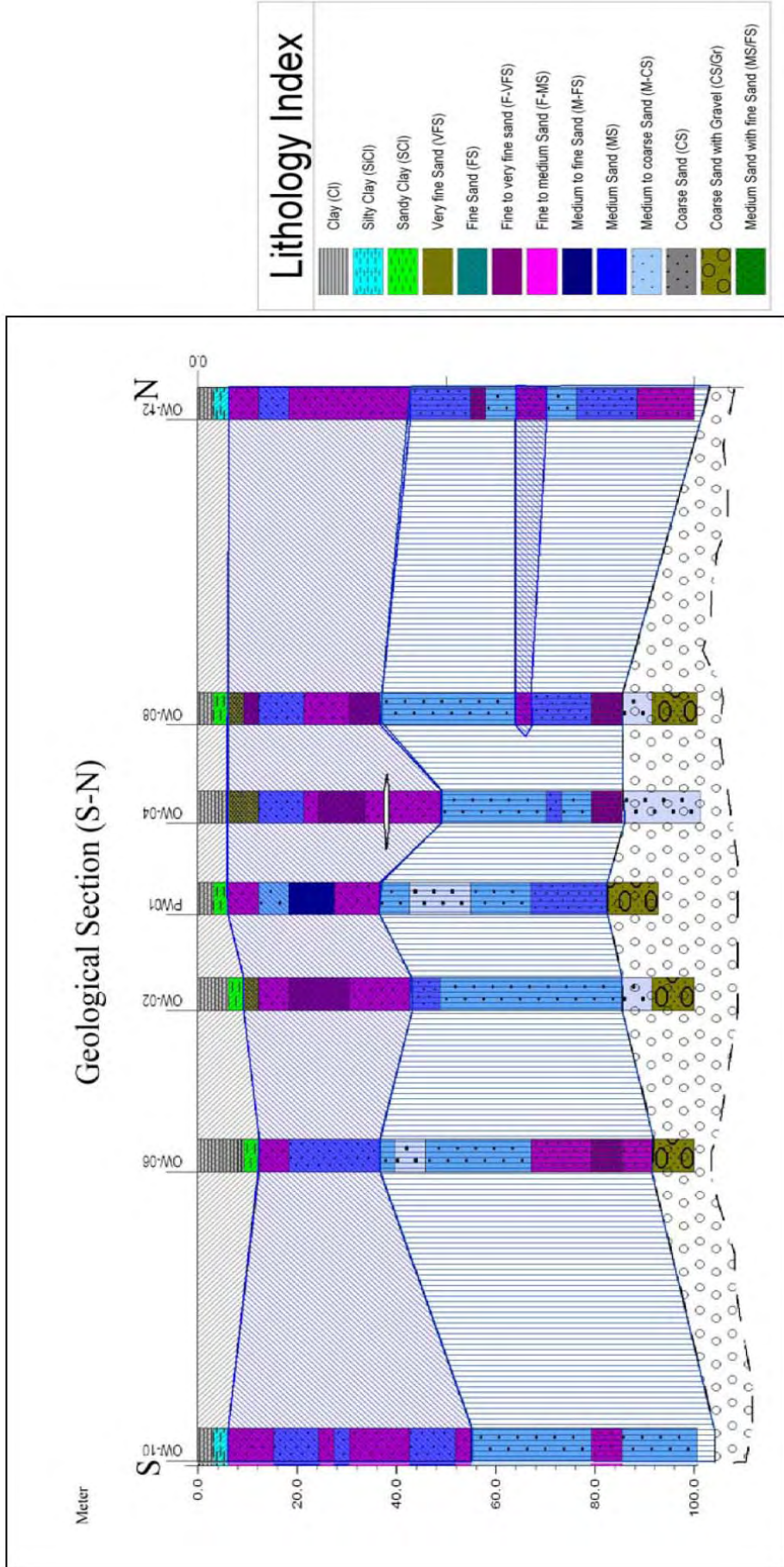


Figure I-4-6-11 帯水層断面図 (S-N)

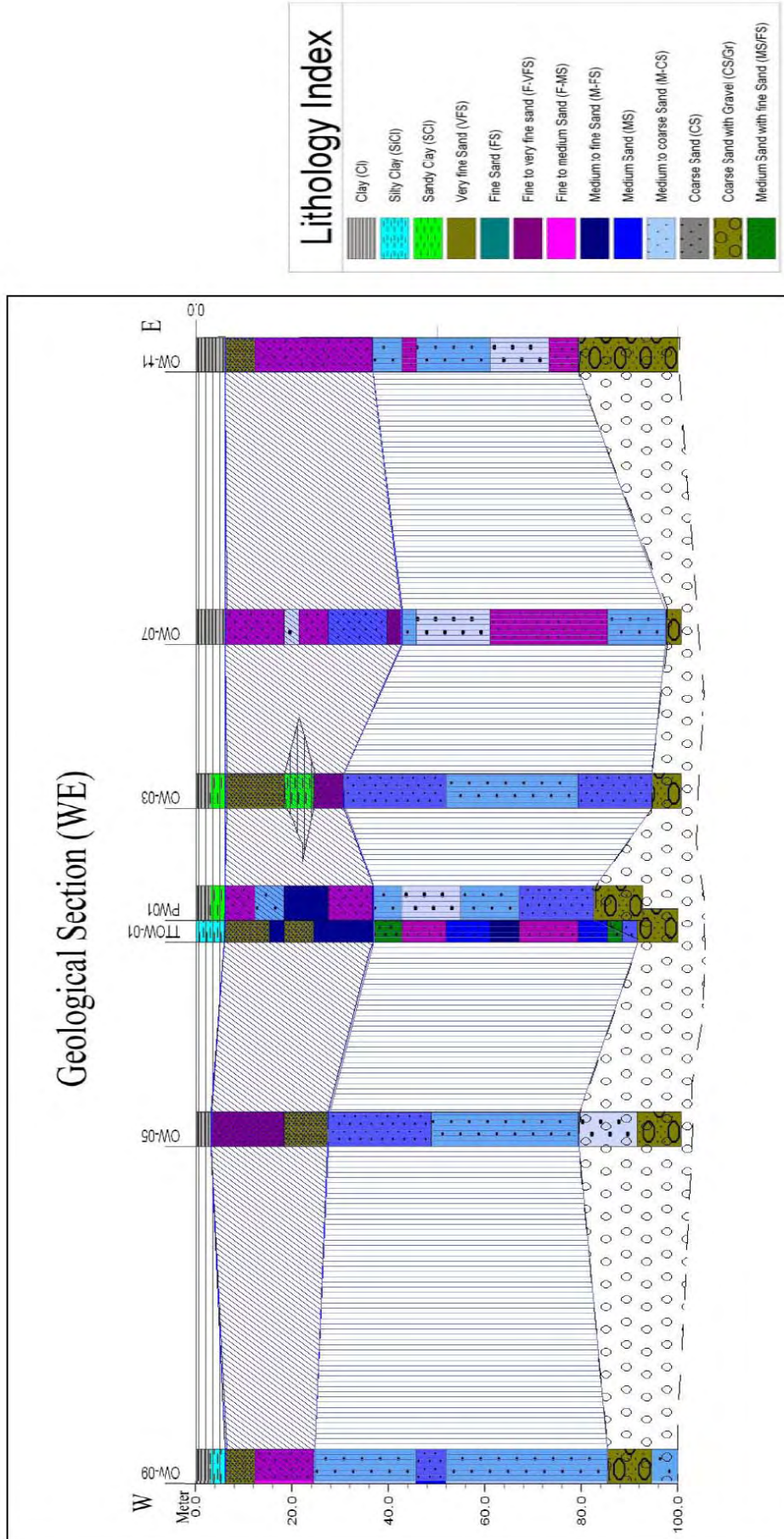


Figure I-4-6-12 帯水層断面図(W-E)

PUMPING WELL (PW-01)

Work: Drilling & well fixture installation of Pumping Well (PW-01) of 350x150 mm dia., shrouded
Project: Bheramara 450 MW Combined Cycle Power Plant, Bheramara, Kushtia
Location: E89°01'00.5? N24°02'59.4? (inside-'Site-A' and beside canal of GK Project)
Drilling completion: 24 August to 09 September 2008
Well installation: 09 September to 10 September 2008

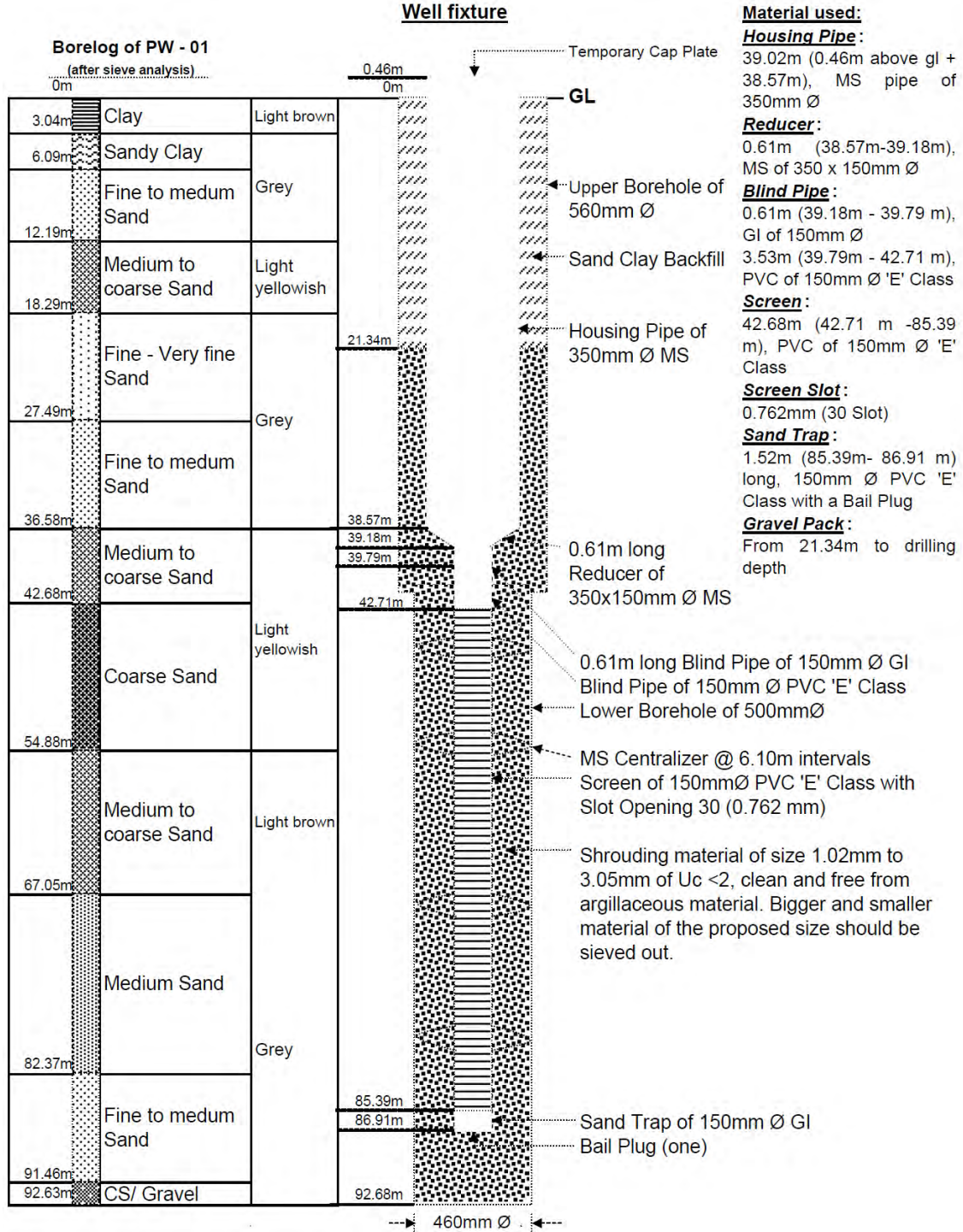


Figure I-4-6-13 揚水井

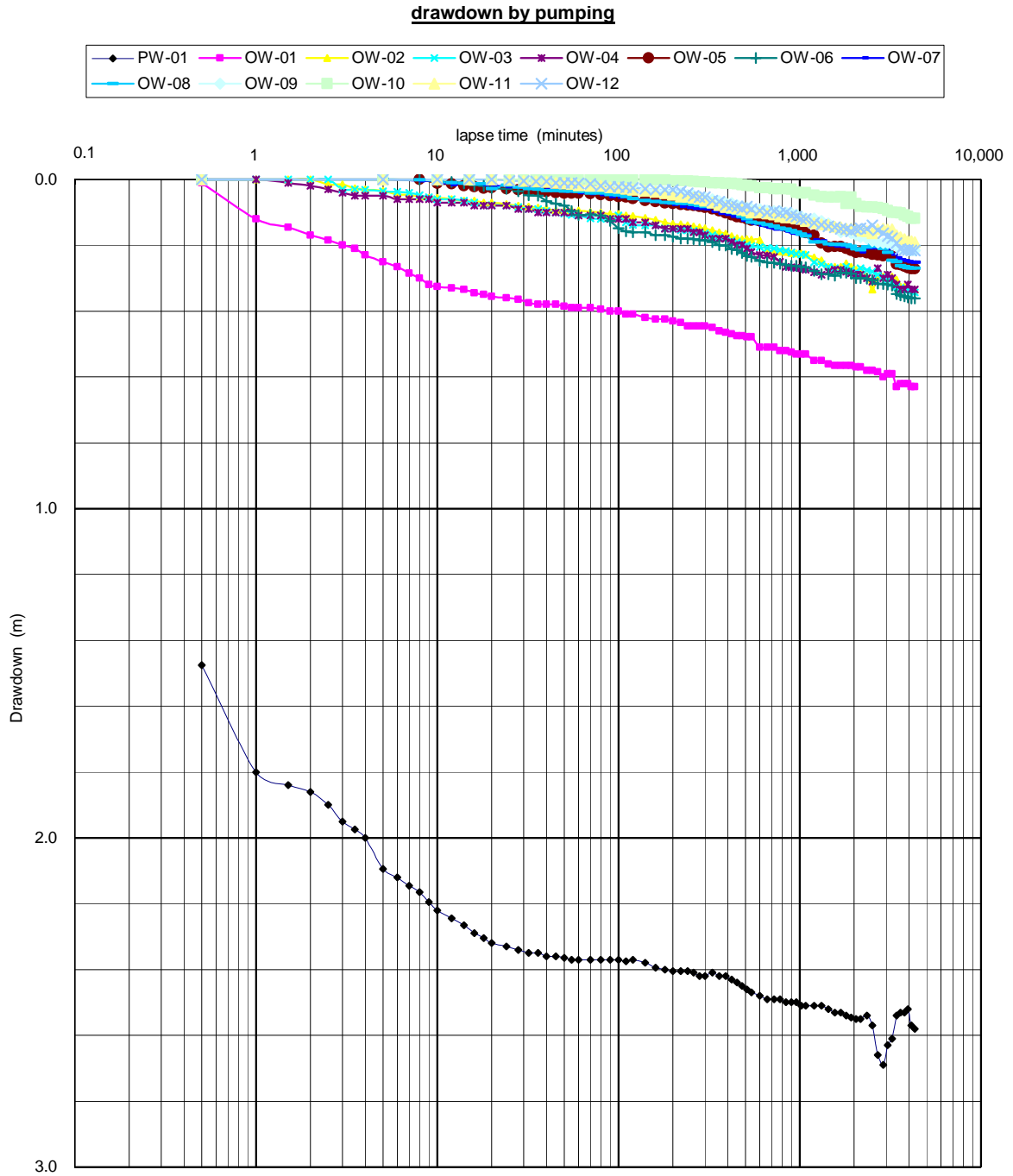


Figure I-4-6-14 揚水試験結果

揚水試験結果を解析し、帯水層の水理定数（透水係数(K)、透水量係数(T)、貯留係数(S))を求めた。

被圧地下水の公式

タイス (Theis (1935)) は 被圧帯水層への貫入井戸の非定常流解析法を導いた。

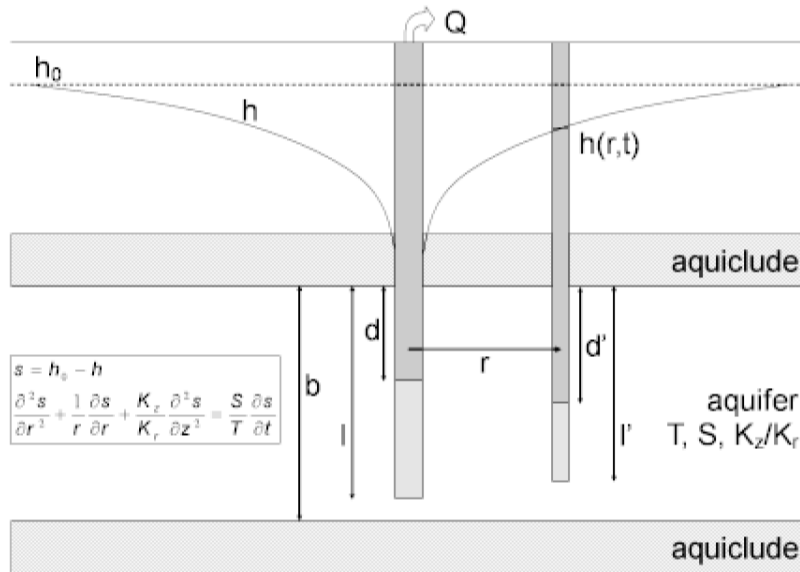


Figure I-4-6-15 被圧帯水層

公式は以下の通り:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s_D = \frac{4\pi T}{Q} s$$

$$t_D = \frac{Tt}{r^2 S}$$

ここで、

- Q : 揚水量 [L³/T]
- r : 揚水中心からの距離 [L]
- s : t 時間揚水したときの水位低下量 [L]
- S : 貯留係数 [無次元]
- t : 揚水時間 [T]
- T : 透水量係数 (T=Kb) [L²/T]

不圧地下水の公式

ニューマン (Neuman (1972, 1974)) は 不圧帯水層への全貫入もしくは部分貫入井戸の遅延重力応答による非定常流解析法を導いた。

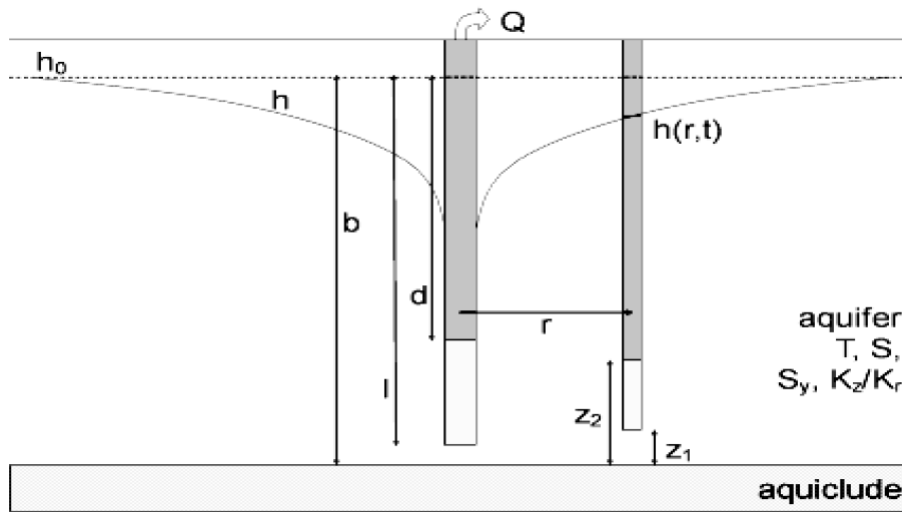


Figure I-4-6-16 不圧帯水層

公式は以下の通り:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{\infty} 4yJ_0(y\sqrt{\beta}) \left[u_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(y) \right] dy$$

$$\beta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r}$$

$$\sigma = \frac{S}{S_y}$$

$$t_s = \frac{Tt}{Sr^2}$$

$$s_D = \frac{4\pi T}{Q} s$$

ここで、

b : 不圧帯水層の層厚 [L]

K_r : 周方向透水係数 [L/T]

K_z : 鉛直方向透水係数 [L/T]

Q : 揚水量[L³/T]

r : 揚水井中心からの距離 [L]

s : t 時間揚水したときの水位低下量 [L]

S : 貯留係数 [無次元]

S_y : 固有収量 [無次元]

t : 揚水時間 [T]

T : 透水量係数 [L²/T]

Table I-4-6-3 にタイスの解析法による結果、Table I-4-6-4 にニューマンの解析法による結果をそれぞれ示す。

Table I-4-6-3 帯水層の水力定数 (タイスの解析法)

Observation Well	T (m ² /d)	S	K (m/d)
OW-1	6063	0.001	60.6
OW-2	7509	0.007	75.1
OW-3	7509	0.006	75.1
OW-4	8537	0.004	85.4
OW-5	6894	0.007	68.9
OW-6	3058	0.004	30.6
OW-7	6894	0.007	68.9
OW-8	7195	0.019	72.0
OW-9	4495	0.009	45.0
OW-10	5110	0.028	51.1
OW-11	5810	0.006	58.1
OW-12	6063	0.007	60.6

Table I-4-6-4 帯水層の水力定数 (ニューマンの解析法)

Obs. Well	Early				Late				Average		
	T (m ² /d)	S	Kh (m/d)	Kv (m/d)	T (m ² /d)	Sy	Kh (m/d)	Kv (m/d)	T (m ² /d)	Kh (m/d)	Kv (m/d)
OW-1	2498	0.008	25.0	8.7	2498	0.40	25.0	8.66	2498	25.0	8.7
OW-2	4929	0.005	0.0	8.9	3168	0.16	31.7	5.73	4049	15.9	7.3
OW-3	4929	0.003	49.3	7.2	3168	0.14	31.7	4.62	4049	40.5	5.9
OW-4	4605	0.003	46.1	9.0	3391	0.12	33.9	6.63	3998	40.0	7.8
OW-5	5275	0.004	52.8	7.7	4302	0.04	43.0	6.24	4789	47.9	7.0
OW-6	3755	0.003	37.6	9.2	4019	0.02	40.2	0.10	3887	38.9	4.7
OW-7	4451	0.004	44.5	4.3	4605	0.02	46.1	4.44	4528	45.3	4.4
OW-8	7667	0.011	76.7	3.5	4929	0.04	49.3	2.26	6298	63.0	2.9
OW-9	2333	0.005	23.3	6.1	4451	0.02	44.5	1.17	3392	33.9	3.6
OW-10	5275	0.022	52.8	1.2	5099	0.04	51.0	1.11	5187	51.9	1.1
OW-11	6692	0.005	66.9	4.1	4764	0.02	47.6	2.92	5728	57.3	3.5
OW-12	5841	0.005	58.4	1.7	4302	0.02	43.0	1.23	5072	50.7	1.4

タイスおよびニューマンの解析法による帯水層の透水量係数の平均値は、それぞれ 6,261 m²/日 and 4,456 m²/日となった。今回の調査では掘削深度が帯水層の底面に達しておらず、帯水層厚はさらに厚いことが想定され、透水量係数は 10,000 m²/日を超えることも考えられる。Howard Humphre (1984)は KT-2 (Amguri, Meherpur, Kushtia)地点 と KT-6 (Darmaehali, Gangi, Kushtia)地点の透水量係数をそれぞれ 9,800 m²/日 and 5,700 m²/日と試算している。

非圧密細砂の透水係数は 2x10⁻⁷ to 2x10⁻⁴ m/s の範囲、同様に礫では 3x10⁻⁴ to 3x10⁻² m/s の範囲となる(Domenico and Schwartz 1990)。当サイト地点において、帯水層の水平方向の透水係数(Kh)の平均値は 42.5 m/日 (≈ 5x10⁻⁴ m/s)である。この値は帯水層を構成する細砂から礫の値の範囲内に収まっており妥当である。

地下水データとして参照した井戸：KTA-7、BWDB の事務所西側 (G.K. ポンプ基地か

ら約 3km 地点) での地下水位観測データと同じ期間のパドマ川の水位観測データを Figure I-4-6-17 に示す。図は両者がよく連動していることを示している。

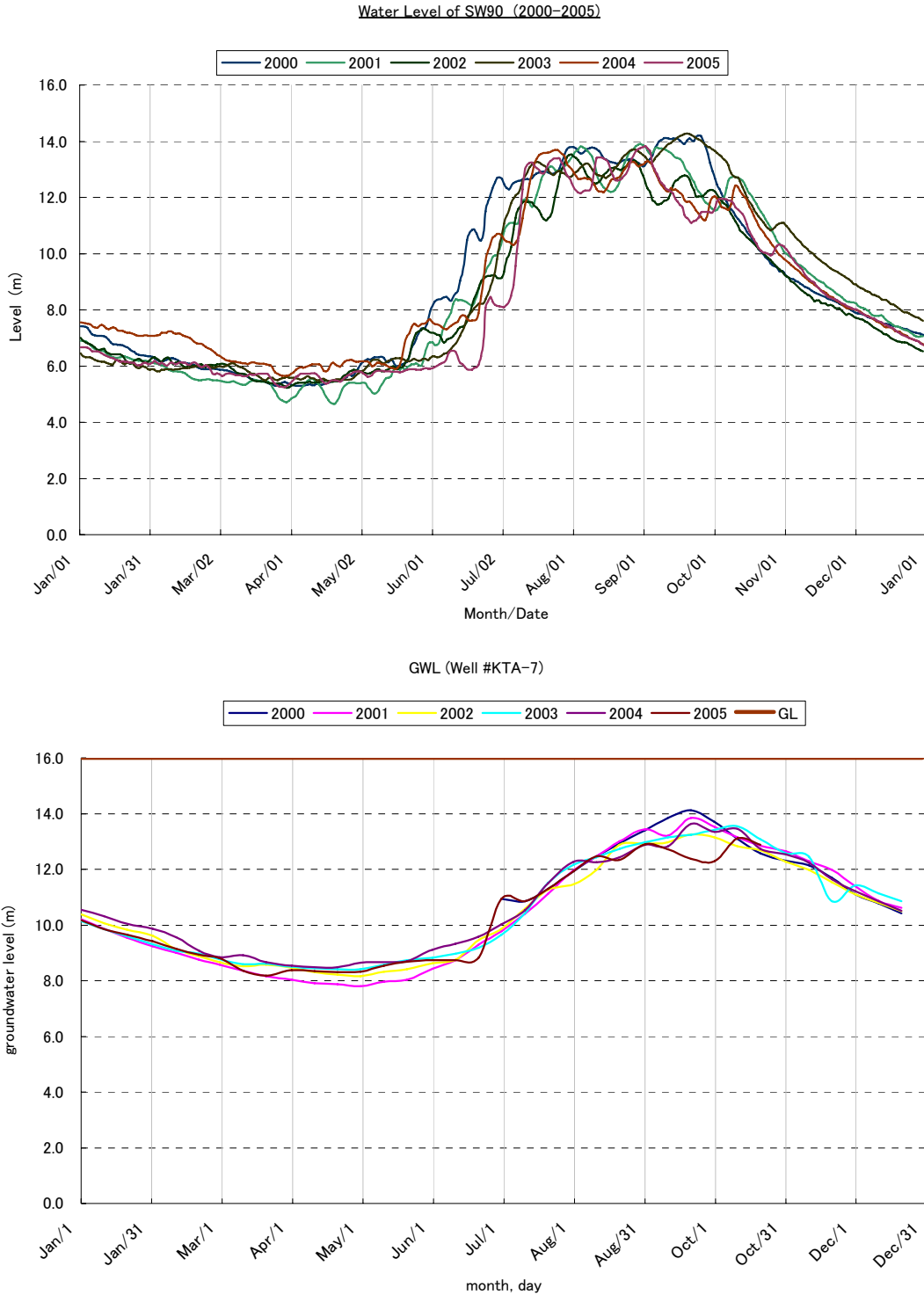


Figure I-4-6-17 井戸 : KTA-7 での地下水位とパドマ川の水位比較

KTA-7 を含む既設観測井戸の水位記録に基づき、サイト近傍地域の地下水位コンター図が作成されている。

乾季(4月もしくは5月)に地下水位は最低となる。Figure I-4-6-18 は乾季の最低地下水位コンターを示す。地下水位の最低値は通常パドマ川付近となる。

雨季(8月もしくは9月)に地下水位は最高となる。Figure I-4-6-19 は雨季の最高地下水位コンターを示す。地下水位の最高値は通常パドマ川付近となる。これは帯水層がパドマ川と良く繋がっていることを示している。

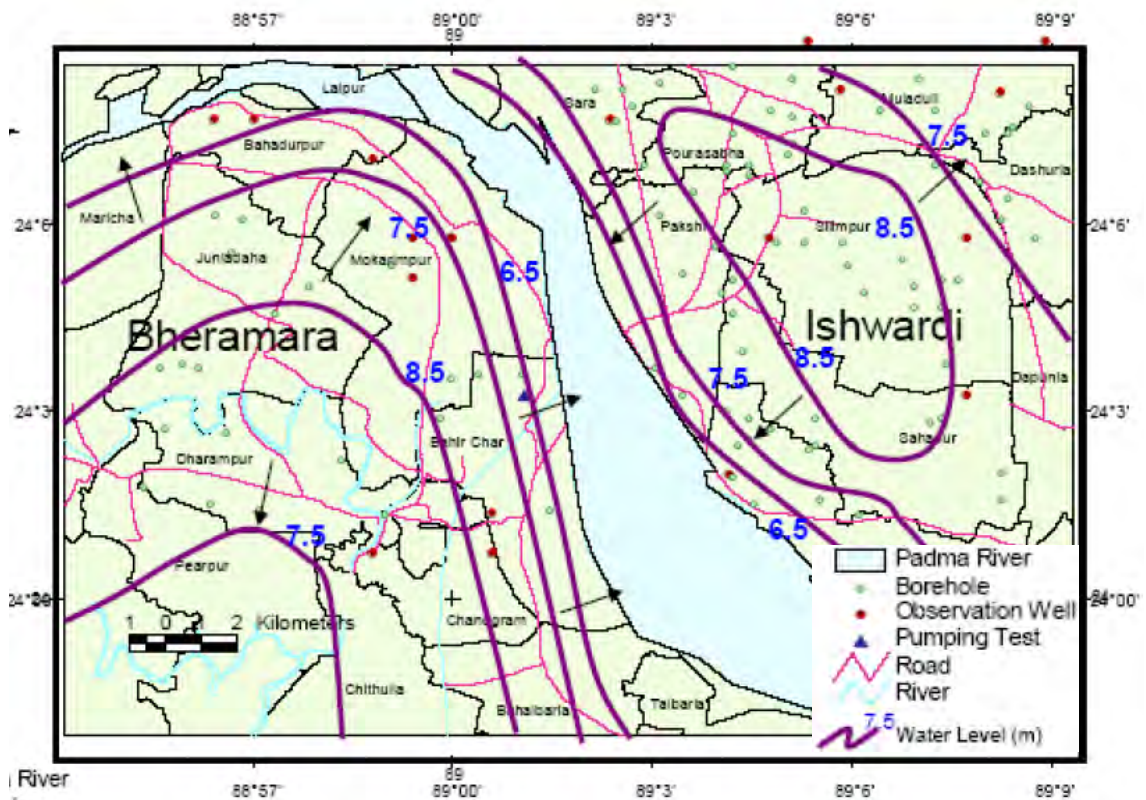


Figure I-4-6-18 最低地下水位コンター図 (乾季)

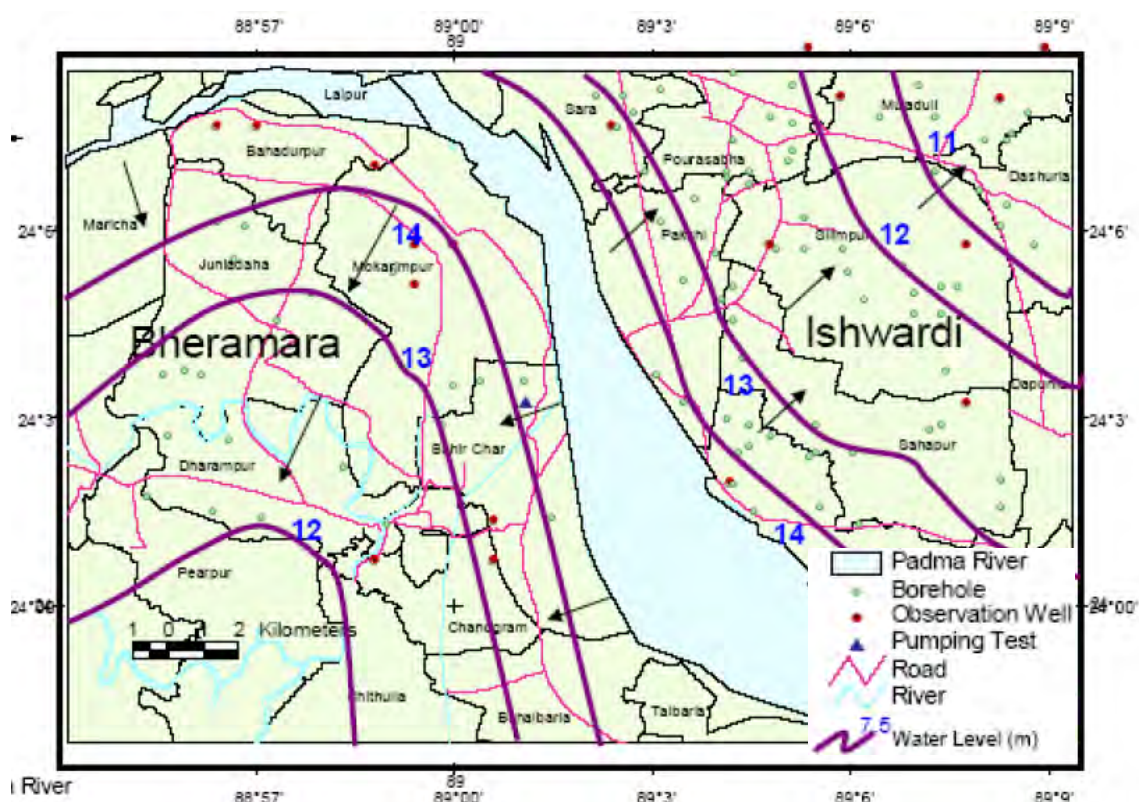


Figure I-4-6-19 最高地下水位コンター図 (雨季)

2) 既存井戸調査

バヒルシャー地区において既存井戸の調査を実施した。

同地区で現在使われている井戸の種類は、以下の3種類であった。

- ・手押しポンプ井戸
汲み上げ量：0.3l/s (0.02m³/m)程度、深さ：8～16m、用途：各戸飲料水・生活用水
- ・浅井戸(動力ポンプ汲み上げ)
汲み上げ量：15l/sec (0.9m³/m)程度、深さ：40～50m、用途：灌漑用水
- ・深井戸(動力ポンプ汲み上げ)
汲み上げ量：160m³/m程度、深さ：90～100m、用途：灌漑用水

手押しポンプ井戸は原理上一気圧（10m水高）以上の汲み上げは不可能であり、実質的には7.5m程度が汲み上げの限界である。Figure I-4-6-17 に示すように、乾季の地下水位は手押しポンプ井戸の汲み上げ限界付近の値を示しているが、今回調査した結果、乾季に汲み上げが出来ない井戸は無かった。

バヒルシャー地区の既存井戸調査結果を Table I-4-6-5 に、既存井戸分布図を Figure I-4-6-20 に示す。

Table I-4-6-5 既存井戸調査結果

J.L. No.	Geo code	Locality	Area (km ²)	House Hold (nos)	Population (2001) (head)	HTWs (nos)	STWs (nos)	DTWs (nos)	Water Bodies (nos)
30	213	Chak Bheramara	0.81	196	929	151	4	1	11
165	307	Char Mocarimpur	4.04	122	492	79	9		13
168	331	Char Ruppur	1.28	28	346	18	6		17
29	355	Damukdia	2.97	647	3,095	415	8	2	12
		Char Damukdia		181	936	173	3	1	4
		Purba Damukdia		365	1,705	166	3		5
		Paschim Damukdia		101	454	76	2	1	3
166	902	Pashchim Bahirchar	12.88	3,412	16,889	2,077	5	5	53
		Powerhouse Coloney		175	767	28			1
		Bara Dag		279	1,420	277	1	1	4
		68 Para		141	694	109		1	3
		Moslempur		444	2,218	153	1		3
		Munshi Para		241	1,174	185			4
		Sholadag Dakshinpara		552	2,716	437	1		8
		Sholadag		551	2,712	274			9
		Paschim Bahirchar		856	4,334	456	2		13
		Pumphouse Coloney		70	353	112		3	6
		Bengal Para		103	501	46			2

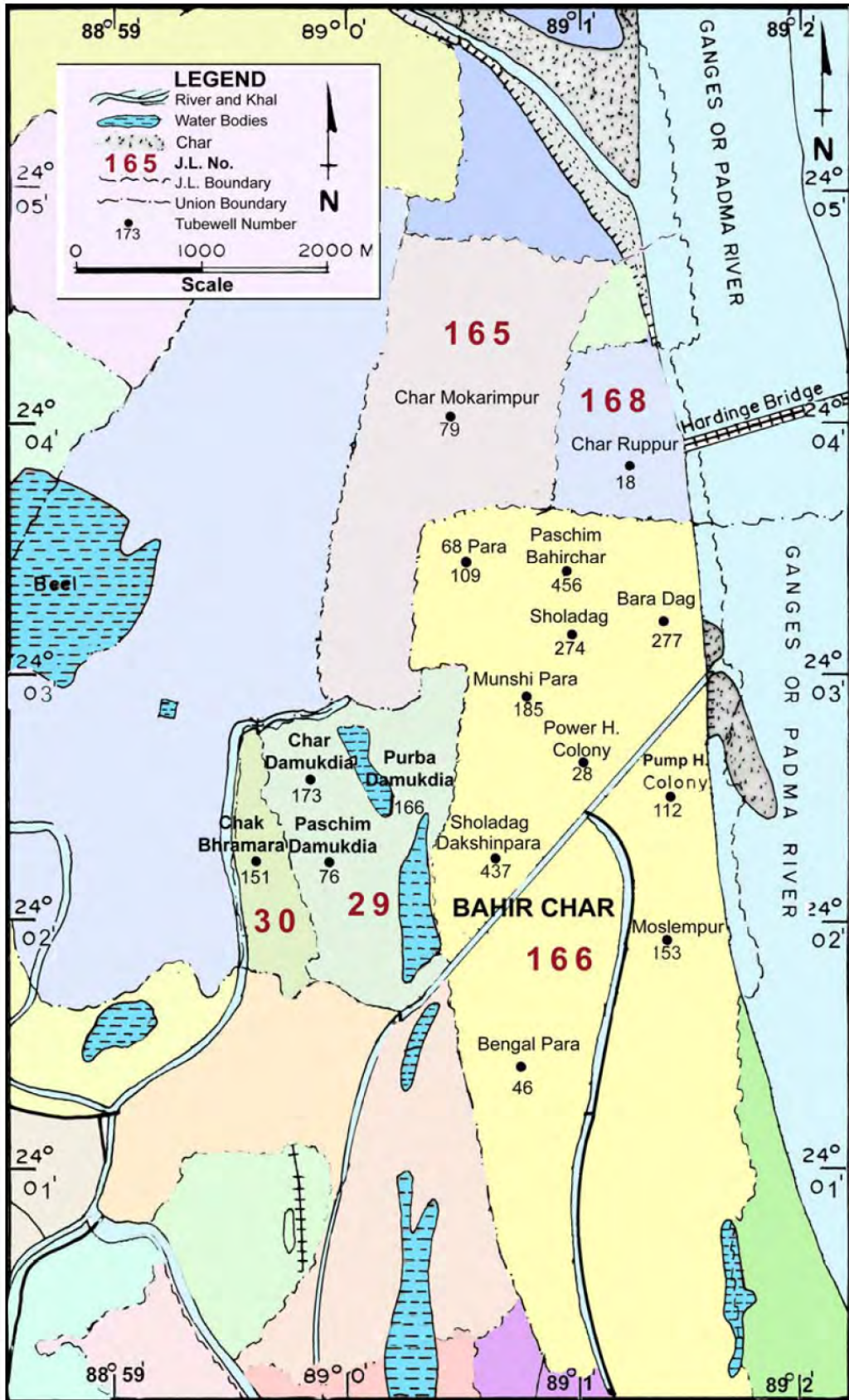


Figure I-4-6-20 既存井戸分布図

3) 地下水解析

本解析の目的は、ベラマラ地区のサイト近傍で帯水層が冷却塔の補給水として使用する $1,300\text{m}^3/\text{時}$ の地下水を連続的に供給可能かどうか推定することにある。地下水モデルは通常、帯水層の進展の可能性を推定するために用いられる。これは現実世界の機構に関連する励起-反応関係を大まかに模擬した機構や進行状況を提示するものであり、また正しい数学的、物理的枠組みを通して地下水資源の量的評価を示すものである

(Bear and Bachmat 1991)。MODFLOW は 3 次元地下水流れの原理に基づく総合解析モデルである。これは広範囲に適用可能な一般化された解析ツールであり、モデル作成過程または計算結果をいつでも断面および平面で表示可能となっている。

調査地点のデータにより MODFLOW を用いてモデル解析を実施した。モデルの形状は、地点のボーリングデータを基に作成した。帯水層の定数は、先に示したとおり解析で求めモデルに入力した。川の境界、涵養および蒸発散量境界は推定値を用いて設定した。モデルのキャリブレーションは井戸：KTA-7 のデータを用いて実施した。これらその後、 $31,200\text{ m}^3/\text{日}$ の水量を 20 年間連続揚水した場合の地下水位および地下水の状況について予備モデル解析を実施した。

乾季（5 月）における 20 年間の連続揚水予備解析結果を Figure I-4-6-21 に示す。また、雨季（9 月）における 20 年間の連続揚水予備解析結果を Figure I-4-6-22 に示す。

図のコンター線は地下水位の等深線を示している。乾季（5 月）においてはパドマ川の右岸（発電所側）、左岸ともに川に向かってほぼ平行に等深線が陸側から乾季のパドマ川の水位である $E L + 5.0\text{m}$ まで徐々に下がっている状況およびサイトの揚水地点を中心に同心円状に地下水位が $E L + 3.0\text{m}$ 以下まで低下している状況を示している。また、雨季（9 月）においては逆に雨季のパドマ川の水位である $E L + 12.0\text{m}$ から陸側に川に平行な等深線が徐々に下がっている状況およびサイトの揚水地点を中心に同心円状に地下水位が $E L + 9.5\text{m}$ 以下まで低下している状況を示している。

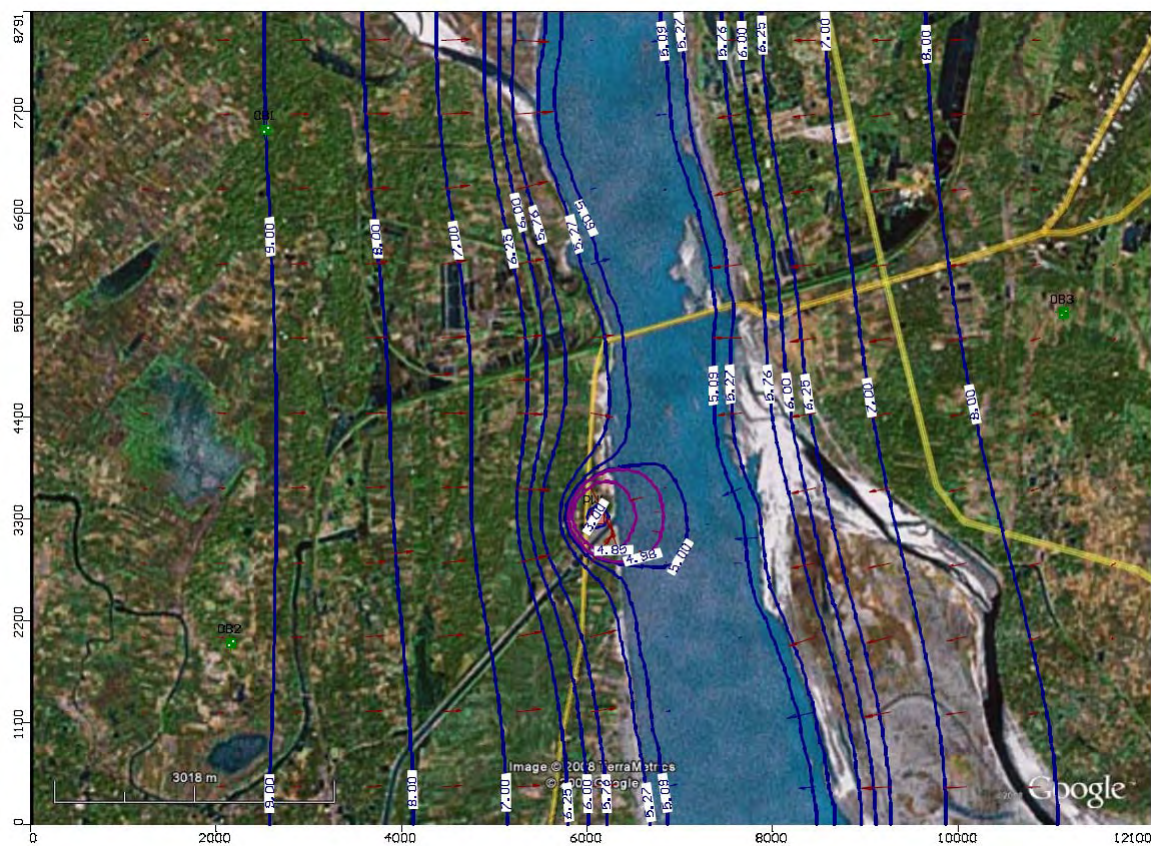


Figure I-4-6-21 乾季（5月）における20年間の連続揚水予備解析結果

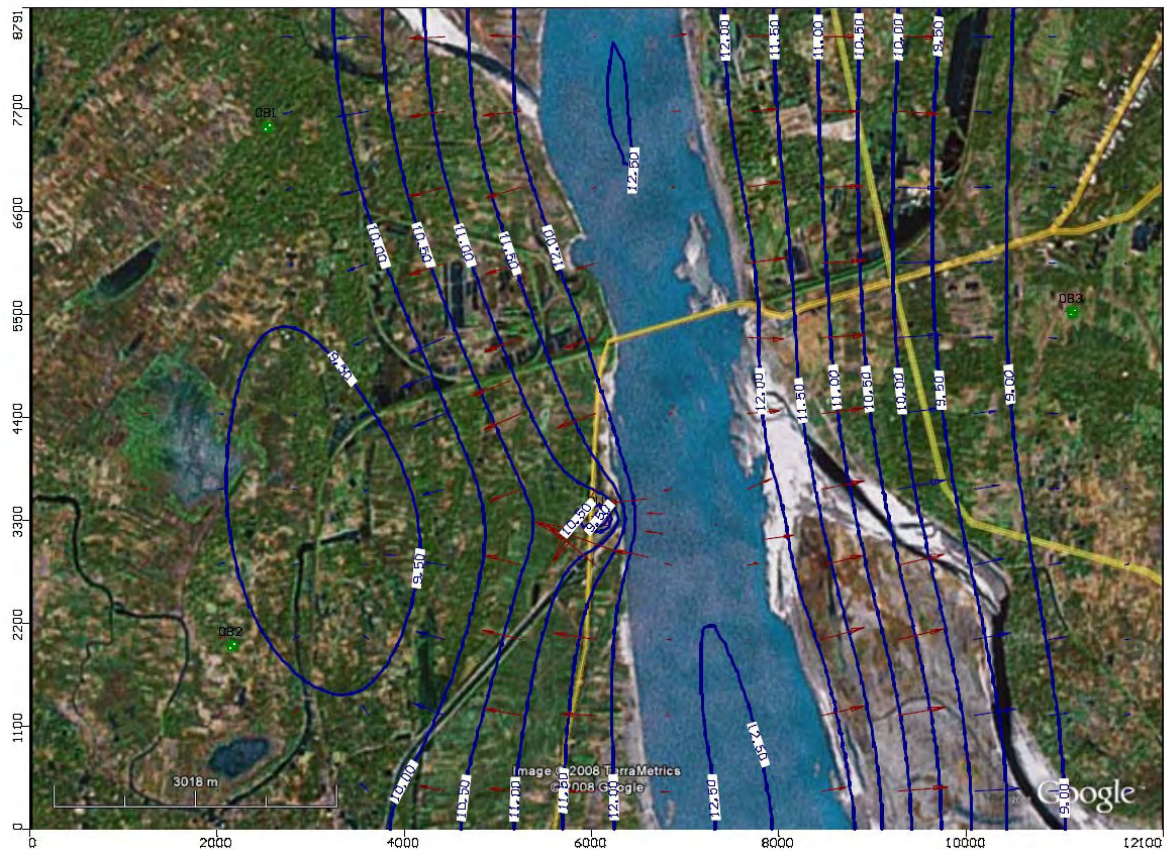


Figure I-4-6-22 雨季（9月）における20年間の連続揚水予備解析結果

4) 地下水調査のまとめ

上記の通り、調査により求めた帯水層の水理特性をもとに実施した予備解析の結果は、サイトの帯水層が、地下水位の大幅な低下等の周辺環境への悪影響無しに、冷却塔の補給水として必要な $31,200 \text{ m}^3/\text{日}$ ($=1,300\text{m}^3/\text{時} \times 24 \text{ 時}/\text{日}$)を連続して供給可能であることを示している。また、パドマ川からは、毎年顕著に帯水層への水供給がなされている。

周辺環境への影響を最小化するための最適な井戸配置の検討及びそれに基づく揚水解析は、4.7.4 冷却設備の選択 (2) 冷却設備の取水検討にて実施した。

なお、地下水調査結果に基づく帯水層の水理特性の設定、それに基づく解析については、用いた計算モデル、入力条件及び計算結果までそのすべての検討内容の妥当性について地下水動態・水文専門家(工学博士)へのヒアリングを実施し、概ね妥当であるとの結論を得た。

地下水調査・検討の詳細結果は添付資料2 地下水調査報告書および添付資料3 地下水解析報告書に示す。