

- ・ 効果確認試験（トリータビリティ試験）
報告書

**Pilot Survey for Disseminating SME's Technologies for
Groundwater Remediation by Bioremediation of Sal
River and Bethora Industrial Estate.**

**= Bore Well Installation, EDC-M Microcosm Test in the
Laboratory, Ion-Exchange Resin Laboratory Test,
and On-Site Ion-Exchange Resin Unit Demonstration =**

EcoCycle Corporation

Index

1. Geophysical Survey, Boring and Test Well Installation	3
1.1. Aim	3
1.2. Groundwater Sampling, Testing and Analysis Results	3
1.3. Summary	9
2. Bioremediation of Contaminated Site	10
2.3. Biostimulation and Microbial Degradation	11
2.9. Nutrients Safety Issue	13
3. EDC-M Microcosm for Bioremediation of Hexavalent Chromium-Bethora	15
3.2. Groundwater Sampling and Microcosm Methods	15
3.3. Microcosm Test Results	19
3.4. EDC-M Microcosm Test Result-Cuncolim	20
4. Chromium Electroplating Wastewater Treatment by Ion-Exchange Resins & Cr(VI)	22
4.1. Introduction	22
5. Hexavalent Chromium Removal from Aero Coach Plating Wastewater of Bethora	25
5.1. Aim	25
5.2. Ion-Exchange Resin Laboratory Test Method	25
5.3. Ion-Exchange Resin Laboratory Test Results	27
6. Ion-Exchange Resin Unit Installation and Demonstration in Aero Coach, Bethora	28
6.1. Installation and Operation of Ion-Exchange Unit in Aero Coach Electroplating Facility	28
6.2. Ion-Exchange Resin Unit Test Results	29
Appendix: Ion-Exchange Unit Specification, Maintenance Information	31

1. Geophysical Survey, Boring and Test Well Installation in Bethora Industrial Estate and Cuncolim Industrial Estate

1.1. Aim

To find out heavy metal pollution in groundwater including hexavalent chromium by soil boring and test well installation for groundwater monitoring and for possible pilot bioremediation application. We have also studied soil analysis of Sunrise Zinc dump site, Nicomet factory and groundwater testing of Nicomet secured landfill site test wells before and results were submitted in one of our previous reports submitted.

Geophysical study was carried out in early March 2015 to understand the groundwater availability and groundwater levels in Bethora industrial estate and Cuncolim industrial estate and after the geophysical study 7 borings were done and installed screen wells for groundwater monitoring/testing in Bethora industrial Estate (Here, test well names are BT-1, BT-2, BT-3, BT-4, BT-5, BT-6, and BT-7) along the Nullah flow direction from Electroshine, an electroplating facility to United Breweries premises. Similarly 7 borings done and screen wells were installed for groundwater monitoring/testing in Cuncolim industrial estate (Here, test well names are CC-1, CC-2, CC-3, CC-4, CC-5, CC-6, and CC-7). Here, test wells were installed for mapping of groundwater quality at possible contaminated areas and reference well, where CC-1 test well were installed near old Cucolim IDC office, CC-2 test well is in front of Nicomet factory and close to agricultural canal, CC-3 test well were installed back side of Nicomet factory, and CC-4, CC-5 test wells installed in front of Sunrise Zinc dump site and CC-6 and CC-7 test were installed back side of Sunrise Zinc dump site. For both the Bethora and Cuncolim industrial estate test well points were depicted in a map in one of our previous reports submitted.

1.2. Groundwater Sampling, Testing and Analysis Results

All 14 test well groundwater's were collected using bailer as shown in picture 1.1 and analyzed for metals such as Copper, Fluoride, Mercury, Cadmium, Arsenic, Lead, Zinc, Chromium(VI), Chromium(III), Manganese, Nickel, Iron and Sulphate, and Cobalt was additionally analyzed in Cuncolim industrial estate as Cobalt ore was used in that industrial estate. Groundwater analysis data from Bethora industrial estate and Cuncolim industrial estate are summarized Tables 1.2 to 1.7 for sampling date in April 2015, December 2015, and February 2016. All the analysis results summarized in Table 1.2 to 1.7 were conducted by 3rd party Laboratory in Goa. Table 1.1 shows the test method, IS:10500 (2012) drinking water standards, and detection limits for respective analyte.

However, we have not found hexavalent chromium above drinking water permissible limits in groundwater's of Bethora Industrial Estate and Cuncolim Industrial Estate, thus we have not done bioremediation pilot test onsite. Instead we have done Laboratory treatability/microcosm test for hexavalent chromium bioremediation using Bethora industrial estate groundwater and chromium plating effluents as explained in section 3. In addition we have also done ion-exchange laboratory tests for removal of hexavalent chromium from chromium plating effluents as explained in section 5. We have also carried out onsite demonstration of Ion-exchange Resin unit for the removal of chromium from plating wastewater in Aero Coach plating facility in Bethora Industrial Estate area.



Picture 1.1. Groundwater Sampling by Bailer Using Test Well in Cuncolim Industrial Estate.

Table 1.1. Groundwater Analysis Methods, IS:10500 Standards and Detection Limits of Analytes

No	Parameter	Unit	IS:10500	Analysis Method	LOD (Detect Limit), mg/l
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	IS 3025: Part 42: 1992, Reaff 2009	0.001
2	Fluoride as F	mg/l	1	APHA-22nd Ed, No. 4550 F & B, -D	0.01
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	IS 3025: Part 48:1994	0.0002
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	IS 3025: Part 41:1992, Reaff 1998	0.001
5	Arsenic As	mg/l	0.01	APHA-22nd Ed, No. 3114, B	0.002
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	IS 3025: Part 47: 1994, Reaff 2003	0.01
7	Zinc as Zn	mg/l	5	IS 3025: Part 49:1994, Reaff 2003	0.01
8	Hexavalent chromium as Cr(VI)	mg/l	0.05	IS 3025: Part 52: 2003	0.001
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	IS 3025: Part 24: 1986, Reaff 2009	0.5
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	APHA-22nd Ed, No 3500, Mn	0.1
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	IS 3025: Part 54:2003	0.002
12	Trivalent chromium as Cr(III)	mg/l	--	IS 3025: Part 52: 2003	0.001
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	IS 3025: Part 53: 2003	0.01
14	Cobalt as Co	mg/l	--	APHA-22nd Ed., 311-B	0.005

Table 1.2. Test Well Groundwater Analysis of Bethora Industrial Estate

No	Parameter	Unit	IS 10500	BT-1	BT-2	BT-3	BT-4	BT-5	BT-6	BT-7
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	0.023	0.011	0.003	0.2	0.12	0.01	0.08
2	Fluoride as F	mg/l	1	0.35	0.16	0.16	1.84	1.69	0.6	0.78
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	ND	ND	ND	ND	ND	0.001	0.001
5	Arsenic as As	mg/l	0.01	7E-04	4E-04	3E-04	ND	ND	ND	ND
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	ND	0.11	0.08	0.28	0.47	0.15	0.17
7	Zinc as Zn	mg/l	5	0.66	0.079	0.16	2.68	2.88	0.47	1.87
8	*Hexavalent chromium as Cr ₆ ⁺	mg/l	0.05	0.003	BDL	BDL	0.03	ND	BDL	0.003
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	9.1	3.33	2.45	146.5	18.73	13.65	15.75
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	0.17	0.12	0.19	0.34	0.02	0.05	0.19
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	0.03	ND	ND	0.1	0.96	0.02	0.1
12	Trivalent chromium as Cr ₃ ⁺	mg/l		BDL	0.01	0.002	0.19	ND	0.003	0.004
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	0.13	0.39	0.1	2.99	0.81	1.28	0.08
14	Total Chromium as Cr (calculated)	mg/l		0.003	0.01	0.002	0.22	ND	0.003	0.007

Test well groundwater sampling was done on 31st March 2015 , Here BT-1 to BT-7 are test well numbers.

IS 10500, 2012 Drinking water Maximum Acceptable Limits, ND: Not Detected; BDL: Below Detection Limit

According to the analysis data for metals sampled on 31st March 2015 shown in Table 1.2, lead was found in Bethora industrial estate groundwater in the range of 0.08 to 0.47mg/l. In addition Manganese, Nickel, and iron was also found.

Table 1.3. Test Well Groundwater Analysis of Cuncolim Industrial Estate

No	Parameter	Unit	IS 10500	CC-1	CC-2	CC-3	CC-4	CC-5	CC-6	CC-7
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	0.007	0.003	0.03	0.29	0.68	0.69	0.242
2	Fluoride as F	mg/l	1	0.25	0.16	0.26	0.31	0.31	0.35	0.31
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	ND	ND	ND	ND	0.005	0.006	0.001
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	ND	0.05	0.02	0.01	ND	0.03	ND
5	Arsenic as As	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	1E-04	ND	ND
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	0.07	ND	ND	ND	0.18	ND	ND
7	Zinc as Zn	mg/l	5	0.17	0.2	0.67	2.48	1.08	3.11	3.26
8	*Hexavalent chromium as Cr ₆ ⁺	mg/l	0.05	ND	BDL	0.006	0.003	0.025	0.02	0.02
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	0.18	19.95	23.63	11.03	39.2	30.28	46.03
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	0.14	0.24	0.34	0.19	0.14	0.87	0.6
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	ND	0.39	0.023	ND	0.05	0.02	0.17
12	Trivalent chromium as Cr ₃ ⁺	mg/l		0.004	0.01	0.004	0.005	0.005	BDL	BDL
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	0.35	0.33	0.86	0.65	3.03	1.85	2.09
14	Total Chromium as Cr (calculated)	mg/l		0.004	0.01	0.01	0.008	0.03	0.02	0.02
15	Cobalt	mg/l		0.004	0.08	0.06	0.54	0.12	0.06	0.01

Test well groundwater sampling was done on 2nd April 2015, Here CC-1 to CC-7 are test well numbers.

Table 1.3 shows groundwater analysis data of Cuncolim industrial estate groundwater sampled on 2nd April 2015. Where, Mercury was found traces in front and back side of Sunrise dump site and cadmium was found traces in front and back side of Nicomet, and lead was found in two test wells out of 7 test wells installed in Cuncolim industrial estate. Iron and manganese was found in all test wells in Cuncolim industrial estate.

Table 1.4. Test Well Groundwater analysis of Bethora Industrial Estate

No	Parameter	Unit	IS 10500	BT-1	BT-2	BT-3	BT-4	BT-5	BT-6	BT-7
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	0.006	0.013	0.0026	0.013	0.002	0.007	0.0135
2	Fluoride as F	mg/l	1	0.16	0.5	0.18	0.48	0.53	0.65	0.36
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	0.007	0.0006	ND	0.006	0.005	0.001	0.01
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	0.009	0.0009	0.0015	ND	ND	0.0015	0.0006
5	Arsenic as As	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Zinc as Zn	mg/l	5	0.356	2.054	0.052	0.48	0.018	0.087	0.438
8	*Hexavalent chromium as Cr ₆ ⁺	mg/l	0.05	BDL	BDL	0.003	BDL	0.003	BDL	BDL
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	13.48	13.13	11.9	25.38	10.68	11.55	24.5
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	0.89	0.07	0.05	BDL	0.02	BDL	0.02
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	0.023	0.39	ND	0.058	ND	0.025	0.0215
12	Trivalent chromium as Cr ₃ ⁺	mg/l		BDL	0.005	0.003	0.01	0.001	0.02	0.006
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	BDL	BDL	BDL	0.19	0.01	BDL	0.04
14	Total Chromium as Cr (Calculated)	Mg/l		BDL	0.005	0.006	0.01	0.004	0.02	0.006

Test well groundwater sampling was done on 17th December 2015

Table 1.4 shows that groundwater metal analysis in Bethora industrial estate sampled on 17th December 2015, where traces of mercury and cadmium was found in 2 wells out of 7 test wells tested, and Nickel was found in 5 test wells out of 7 test wells. Here higher manganese was found only one test well.

Table 1.5. Test Well Groundwater analysis of Cuncolim Industrial Estate

No	Parameter	Unit	IS 10500	CC-1	CC-2	CC-3	CC-4	CC-5	CC-6	CC-7
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	0.0222	0.0026	0.0045	0.316	0.291	0.622	0.214
2	Fluoride as F	mg/l	1	0.1	0.1	0.23	0.12	0.07	0.11	0.23
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	0.006	0.0326	0.006	0.001	0.004	0.003	0.001
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	0.0015	0.077	0.018	0.0177	0.0194	0.045	0.0545
5	Arsenic as As	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	0.025	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Zinc as Zn	mg/l	5	0.069	0.04	0.693	1.96	1.89	2.21	2.19
8	*Hexavalent chromium as Cr ₆ ⁺	mg/l	0.05	0.009	BDL	BDL	BDL	0.009	0.006	BDL
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	10.5	29.04	67.6	29.1	37.3	49	103.6
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	BDL	0.02	0.63	BDL	0.05	5.19	5.38
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	0.0422	0.613	0.026	0.0495	0.062	0.097	0.191
12	Trivalent chromium as Cr ₃ ⁺	mg/l		0.001	0.006	0.004	0.007	0.001	0.002	0.003
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	0.35	0.02	0.01	0.07	0.03	0.05	0.07
14	Cobalt	mg/l		0.014	0.883	0.032	0.0057	0.024	0.0555	0.071
15	Total Chromium as Cr (Calcul.)	Mg/l		0.01	0.006	0.004	0.007	0.01	0.008	0.003

Test well Groundwater samples were collected on 9th and 18th December

Table 1.5 shows the groundwater metal analysis in Cuncolim industrial area sampled on 9th and 18th December 2015. Here Mercury, Cadmium, Nickel presence in most of the wells observed and Lead was found in one test well exceeding drinking water levels. Manganese and iron found in some of these wells exceeding drinking water standards.

Table. 1.6. Test Well Groundwater analysis of Bethora Industrial Estate

No	Parameter	Unit	IS 10500 : 2012	BT-1	BT-2	BT-3	BT-4	BT-5	BT-6	BT-7
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	0.007	0.009	0.01	0.045	0.083	0.004	0.047
2	Fluoride as F	mg/l	1	0.1	0.64	0.26	0.94	1.25	0.47	0.012
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	ND	ND	ND	0.002	ND	ND	0.005
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	0.001	0.002	0.003	0.008	0.009	0.012	0.012
5	Arsenic as As	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Zinc as Zn	mg/l	5	0.44	1.961	0.437	1.289	1.783	0.108	0.086
8	*Hexavalent chromium as Cr ₆ ⁺	mg/l	0.05	0.01	BDL	BDL	0.01	0.01	0.01	0.01
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	15.89	12.56	9.99	44.85	79.45	49.21	41.52
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	0.98	BDL	BDL	0.4	0.15	0.15	0.29
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	0.03	0.334	0.041	0.163	0.558	0.069	0.003
12	Trivalent chromium as Cr ₃ ⁺	mg/l		BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	3.23	0.25	0.04	3.08	2.25	0.03	2.18
14	Total Chromium as Cr (calculated)	mg/l		0.01	BDL	BDL	0.01	0.01	0.01	0.01

Test well Groundwater samples were collected on 2nd February, 2016

Table 1.6 shows the groundwater metal analysis of Bethora industrial estate samples on 2nd February 2016 and it shows that Mercury traces were found in 2 test well, and Traces of cadmium found in 4 test wells, Nickel was found in 6 test wells. In addition iron and manganese was found in most of these test wells this time.

Table 1.7. Test Well Groundwater analysis of Cuncolim Industrial Estate

No	Parameter	Unit	IS 10500	CC-1	CC-2	CC-3	CC-4	CC-5	CC-6	CC-7
1	Copper as Cu	mg/l	0.05	0.008	0.015	0.002	0.356	0.146	0.535	0.2
2	Fluoride as F	mg/l	1	0.04	0.05	0.14	0.06	0.02	0.19	0.26
3	Mercury as Hg	mg/l	0.001	0.005	ND	ND	ND	ND	0.001	0.003
4	Cadmium as Cd	mg/l	0.003	0.013	0.084	0.026	0.036	0.027	0.077	0.046
5	Arsenic as As	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Lead as Pb	mg/l	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Zinc as Zn	mg/l	5	0.028	0.099	0.779	1.924	1.766	2.216	1.842
8	*Hexavalent chromium as Cr ₆ ⁺	mg/l	0.05	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
9	Sulphates as SO ₄ ²⁻	mg/l	200	13.58	92.26	158.38	26.39	31.52	105.59	186.57
10	Manganese as Mn	mg/l	0.1	0.08	0.25	6.38	3.43	3.51	19.93	15.41
11	Nickel as Ni	mg/l	0.02	ND	0.608	0.041	0.039	0.041	0.18	0.13
12	Trivalent chromium as Cr ₃ ⁺	mg/l		BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
13	Iron as Fe	mg/l	0.3	0.04	0.05	0.1	0.04	0.59	0.25	0.15
14	Total Chromium as Cr (calculated)	mg/l	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
15	Cobalt	mg/l		ND	0.938	0.019	0.022	0.04	0.096	0.012

Test well Groundwater samples were collected on 3rd February, 2016

Table 1.7 shows the groundwater metal analysis sampled on 3rd February, 2016 and it shows that Cadmium and Nickel was found in all most of all test wells and traces of mercury found in 2 test wells. Here manganese was found at higher concentrations.

1.3.Summary

Based on the 3rd party metal analysis data of 14 test wells in Bethora industrial estate and in Cuncolim industrial estate summarized in Table 1.2 to 1.7, it was observed that traces of Mercury, Cadmium, Nickel, etc. was found in both industrial estates test wells at some test well points. This metal content in groundwater could be attributed by unorganized disposal of metal wastes from locally operated industries for many years and/or due to dumpsites located in the industrial estate. But there is a change in metal content seasonal wise (type of metal found in groundwater) and concentrations found by collecting groundwater samples in April 2015, December 2015 and February 2016. Further monitoring is recommended for metal content in these test wells which gives an idea of its concentrations and possibility of natural attenuation where applicable especially before and after monsoon (May and November of the year).

2. Bioremediation of Contaminated Site

2.1. Introduction

Enormous quantities of organic and inorganic compounds are released into the environment as a result of human activities. In some cases, these releases are deliberate and well-regulated in case of industrial emissions. While in other cases they are accidental and largely unavoidable such as chemical spills. Many of these compounds are both toxic and persistent in environment. Emerging technologies for remediation are enhanced bioremediation, *in situ* chemical reduction, thermal, soil-vapor extraction, & *in situ* chemical oxidation.

Biodegradation or Bio-mineralization process has the ability of microorganisms to transform environmental contaminants to degradation end products harmless to man and the environment and have been documented since 1929 (Tausson) and *in situ* bioremediation has been practiced commercially from 1972. Since then the technology has grown from an innovative process to an important & recognized, ecological and economical method of remediating soils & groundwater. In 1980s, United States of America Congress passed the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA) also known as superfund, which was committed to protecting human health and the environment from uncontrolled hazardous waste sites. Later, Japan, Taiwan, and some European countries and other established soil or groundwater regulations. United States is the largest market for bioremediation followed by Japan, Germany, United Kingdom, Canada, and Australia. Austria, Belgium, Brazil, China, Czechoslovakia, Egypt, France, Israel, Ireland, Italia, Netherlands, Polish, Portugal, South Korea, Spain, Sweden, Taiwan are emerging countries are being actively pursuing & implementing bioremediation projects.

Bioremediation has been shown to be effective and have been successfully employed over tens of thousands of sites cleanup throughout the World (some of the countries mentioned above) at a cost approximately 50-80% lower than the other site cleanup technologies. The rapid growth of bioremediation industry has been fueled by regulations that limit the disposal of toxic compounds, driving up the costs of disposal and many environmental regulations making bioremediation attractive.

2.2. Bioremediation & Enhanced Bioremediation Technology Overview

Bioremediation or Biodegradation is the process that uses biological agents to remove/degrade or neutralize contaminants in polluted soil or water and to return the natural environment altered by contaminants to its original condition. "Degradation" means decay, and the "bio-" prefixes means that the decay is carried out by a huge assortment of bacteria, fungi, insects, worms, and other organisms or

their enzymes. Microorganisms have the capacity to remove many contaminants from the environment by a diversity of enzymatic processes. Therefore, Bioremediation provides a technique for cleaning up pollution by enhancing the same biodegradation processes that occur in nature (safer, less expensive and treatment in place/*in situ*-D.R.Lovley, Cleaning up with genomics: Applying molecular biology to genomics, Nature Reviews, Microbiology, 2003, 1, 35-44). Some examples of enhanced bioremediation technologies are biostimulation, bioaugmentation, bioventing, land-forming, composting, and bioreactor.

The contaminants namely, chlorinated hydrocarbons, heavy metals and other inorganics, petroleum hydrocarbons, pesticides, PCBs and PAHS. Bioremediation technologies generally classified as *in situ* or *ex situ*. *In situ* bioremediation involves the removal of the contaminated material at the site, while *ex situ* involves the removal of the contaminated material to be treated elsewhere. *In situ* bioremediation treat contaminants in place, eliminating the need for the soil excavation and limiting volatile releases in to the atmosphere. As a result, many of the risks and costs associated with material handling are reduced or eliminated. Most microorganisms utilize contaminants as a source of energy and biodegrade them and the degradation end products are carbon dioxide, inert hydrocarbon gases, inorganic salts, & water which are not hazardous to the environment.

2.3. Biostimulation & Microbiology of Degradation

Biostimulation involves the modification of the environment to stimulate existing microorganisms capable of bioremediation by adding various forms rate limiting nutrients, electron acceptors, or carbon. Nutrients are added to the subsurface through injection wells. The primary advantage of biostimulation is that bioremediation will be undertaken by already present native microorganisms that are well suited to the subsurface environment, and are well distributed spatially within the subsurface. Also, microorganisms produce natural catalysts (enzymes) which degrade organic compounds forming carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), water, and mineral salts and metals are stabilized in its insoluble and very less toxic forms. Microbial degradation is fast, economical, and does not require heavy machinery or complicated procedures. However, the key factor of *in situ* field bioremediation is the combination of site assessment, effective execution of a remedial action plan.

2.4. Biodegradation Mechanisms and its Advantages

Biodegradation mechanisms are divided into two major areas, one is aerobic bioremediation involves microbial respiration with oxygen and decontamination of petroleum hydrocarbons in the presence of nutrients. Second is anaerobic bioremediation which utilizes hydrogen/organic acid as

microbial energy and chlorinated solvents for respiration along with nutrients for decontaminating. For example, *in situ* bioremediation by electron donor compounds can degrade chlorinated hydrocarbons or electron acceptors can degrade petroleum hydrocarbons, which is much less expensive than common practices such as excavation, pump & treat. The process of bioremediation can be monitored by measuring the oxidation reduction potential together with pH, temperature, oxygen content, electron donor/acceptor concentrations, and concentration of breakdown products.

2.5. Chlorinated Solvents, Hexavalent Chromium Contaminants Concern

Chlorinated solvents such as perchloroethylene (PCE), trichloroethylene (TCE), trichloroethane (TCA), carbon tetrachloride (CT) and other chlorinated compounds are persistent pollutants have been widely used in large quantities for more than 60 years for degreasing of automobiles parts & mechanical tools, dry cleaning, pesticide manufacturing, solvent intermediate in manufacturing. Also, storage and disposal practices of these solvents frequently resulted in releases into soil and groundwater. In hindsight, these flawed practices reflected a misunderstanding of the environmental impacts of what was being done. Chlorinated solvents are dense than water and not very water-soluble sinking in the groundwater, creating large, persistent underground plumes. Most of the commonly used chlorinated solvents are classified as actual or potential cancer-causing compounds and are therefore subject to stringent drinking water standards, ex. <5 microgram/liter. On the other hand, hexavalent chromium compound is toxic as it is oxidant and very soluble in water causing wider areas of pollution once it gets into subsurface by release from various sources causing skin problems.

2.6. Hydrogeology & Hydraulic Conductivity and Implementing Bioremediation

Bioremediation technologies implementation varies depending on the kind of contamination, the hydrogeology, geochemistry, and the accessibility of contaminants. Subsurface characteristics such as groundwater velocity, hydraulic conductivity of the subsurface and lithography of the subsurface along with contaminants concern are influential parameters of bioremediation. Where lower hydraulic conductivity soils needs to be designed well to effective implementation of bioremediation. A detailed site characterization is done by the soil boring and groundwater monitoring of the contaminated area, accordingly, the right king of bioremediation technology that suits onsite is adopted. In some circumstances, treatability of the onsite soil, groundwater is necessary to find out the effectiveness of the bioremediation.

2.7. EDC-M& How the Reaction of Degradation is Performed

There are number of cost efficiency advantages to Electron Donor Compound for metals (EDC-M) based bioremediation, which can be employed in areas that are inaccessible without excavation. EDC-M is an organic substrate of Eco-friendly, cost-efficient, superior method of decontamination. EDC-M contains a variety of nutrients and backbone of organic acids production upon fermentation creating anaerobic conditions onsite. These organic acids are source of molecular Hydrogen which is used as an electron donor in the reductive dechlorination of chlorinated solvents resulting inert hydrocarbons gases. In principle, EDC-M is completely converts to thermodynamically stable end products of methane and carbon dioxide (*Oremland R.S.; Biochemistry of methanogenic bacteria, In Biology of Anaerobic Microorganisms. Edited by Zehnder A.J.B. John Wiley & Sons, New York, 1988, 641-705*).

2.8. How EDC-M Achieves in Decontamination

Upon injection of EDC-M mixing in water to the contaminated soil by using gravitation wells or geoprobe or pressure injection techniques, depending upon the hydraulic conductivity and contaminants concern; the bacteria starts working creating fermentation conditions removing dissolved oxygen in soil-water. Simultaneously producing organic acids, which is a source of hydrogen is a catalyst for microbial process of chlorinated solvents decontamination.

2.9. Nutrients Safety Issue

Bioremediation is a microbial process of the Mother Nature and has ability to absorb the natural way of decontaminating the soil and groundwater. EDC-M nutrient is patented in Japan, US, & Europe technology based on the totally made by food materials. The onsite data of several field applications shows that there is no nutrient remaining in the soil-groundwater after the successful remediation of site. This was also verified by the product complete biodegradability in a matter of time which is also essential for performing the duty. EDC-M nutrient, BOD decline rate was 77% in 28days and DOC decline rate was 100% in 28 days, passing the test of standard laboratory biodegradation test as per the regulatory guidelines of OECD.

2.10. Bacteria & the Strains the Way They Act, What They Do & Why

As humans consume food, water & oxygen for energy, metabolic growth, & respiration, microorganisms consume toxic chemicals directly or indirectly for their metabolic growth & respiration. Dehalogenators such as Dehalococcoides ethenogenes, coccoid Strain 195 to be particularly important in catalyzing dechlorination of chlorinated compounds such as TCE contaminated in subsurface environment. Pseudomonas stutzeri strain KC degrades carbon tetrachloride without forming

chloroform as by-product, which is also a toxic compound. Pseudomonas, Microbacterium, Bacillus subtilis & enzymes, Cr(VI) reductase, Cytochrome-C3 hydrogenase are known for Cr(VI) reduction to Cr(III).

In most cases we do not need to add bacteria to the contaminated area, because, wherever there is a contaminant, there will be existing microorganisms; can achieve faster degradation of contaminants upon biostimulants injection. When, EDC is injected microorganisms are multiplied on site and maintain as long as biostimulant load is available. When, contaminants are gone and no more biostimulant load, certainly microorganisms are gone because no food is available there after decontamination. No mutants is formed upon biostimulation because, biostimulation a Mother Nature way of acting as biomass and give no mutants during and after bioremediation is completed.

2.11. Contaminated Sites and Bioremediation Applications in India

According to inventory and mapping of probably contaminated sites in India, there are several hundreds of sites are contaminated and out of which chromium contaminated sites are about 160 followed by Lead, cadmium, Mercury, Pesticides, Arsenic, and other heavy metals, Cyanide, etc. Some of the heavily Chromium contaminated sites are Ranipet, Kanpur, Vadodara, Ludiana, Lohia Nagar/Ghaziabad, Nibra/Howrah, Hoogly and some sites in Orissa State. There are some footprints available that bioremediation is being applied in pilot or full-scale remediation of contaminated site in India. However, much has to be done by utilizing bioremediation with combination of other remediation technologies with other competitive technologies to tune efficiency, environmental friendly, and economical remediation methods for site cleanup.

2.12. References

1. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>
2. <http://www.jetro.go.jp/en/invest/attract/environment/key.html>
3. A Market Report on The Environmental Management through Biotechnology: Microorganisms and Enzymes, GII Express Market Research, May 01, 2002.
4. Dehalococcoides ethenogenes, <http://www.tigr.org>
5. Management of chlorinated solvents in soils & groundwater, <http://www.estcp.org/Technology/upload/ER-0530-FAQ.pdf>
6. Inventory and mapping of probably contaminated sites in India, Ministry of Environment and Forests, A report by COWI, Kadam, Tauw, 2013.

3. EDC-M Microcosm for Bioremediation of Hexavalent Chromium to Trivalent Chromium from Bethora Industrial Estate Groundwater's/ Effluents.

3.1. Introduction:

Anaerobic microbial reduction/remediation of toxic hexavalent chromium [Cr(VI)] takes place upon EDC-M (EDC-M and EDC-M2) addition to Cr(VI) contaminated groundwater/wastewater and this process takes place by indigenous microbes available in subsurface converting (reduction) to non-toxic trivalent chromium [Cr(III)]. This process is called biostimulation for remediation of contaminated site. The aim of this treatability test is to assess the reduction of Cr(VI) over period of time at the laboratory microcosms. Generally, after the treatability test results of Cr(VI) reduction confirmation in the Laboratory where chromium(VI) is found in groundwater, pilot test is conducted onsite to find out all influential subsurface groundwater parameters of the Cr(VI) microbial reduction mechanisms under different hydro geological conditions followed by full-scale remedial establishment. However, chromium(VI) concentration in all these tests wells found to be below drinking water permissible limits thus, we have not done bioremediation pilot study onsite. These are the typical laboratory testing procedures applied using groundwater/wastewater collected from the Bethora Industrial Estate test well groundwater and chromium plating wastewater from Aero Coach.

3.2. Groundwater Sampling and Microcosm Methods

30 Liters of Cr(VI) contaminated groundwater was collected by seven soil borings or Test wells (bore wells) from the Bethora Industrial Estate by using bailer as shown in picture 3.1 in 5 liter plastic cans and transported to the laboratory. In addition, 30 liters of chromium electroplating plant, Aero Coach effluents were collected and transported to the laboratory. Ground water was mixed in one tank and Aero Coach chromium electroplating effluent were added to get increased chromium concentration where groundwater chromium levels were low in groundwater's and also hexavalent chromium was spiked to make Cr(VI) in groundwater at about 10mg/l for the microcosm test as shown in Picture 3.4. Initial concentrations of pH, hexavalent chromium, dissolved oxygen, oxidation reduction potential, chemical oxygen demand, total dissolved solids, and conductivity were measured as summarized in Table 3.1 (0-day data).

6 Liters of above Chromium(VI) water transferred to Borosil glass bottle as shown in microcosm set up picture 3.4 & 3.5 and additionally transferred 2.2 liters of Cr(VI) water x 2 more Borosil glass bottle. 1.5 gram EDC-M1, 3.0 gram EDC-M2 (totally as EDC-M) and 4.5 gram pH buffer agent was added to 6 liter microcosm bottle. In addition 0.55gram EDC-M1 and 1.1 gram EDC-M2 and 1.65g pH buffer was to 2.2

liter bottles of 2 numbers and mixed all respective bottles gently to dissolve EDC-M and pH buffer agent and keep it at room temperature in dark after Air/ tetra bags were attached to the respective microcosm bottles due to methane gas formation, which is stored in tetra bags. In addition 2.2 Liter control (blank) was kept without adding EDC-M and pH buffer agent.



Picture 3.1. Test Well Water Collection using Bailer



Picture 3.2. Groundwater Collected from Test Wells Installed in Bethora Industrial Estate Area



Picture 3.3. Electroplating Effluents Collected from Aero Coach in Bethora Industrial Estate



Picture 3.4. Bethora Industrial Estate Groundwater Mixed with Aero Coach Electroplating Effluents and with Hexavalent Chromium Before EDC-M1 & EDC-M2 Nutrients Addition



Picture 3.5. After EDC-M Nutrients and pH Buffer Added to Hexavalent Chromium Solutions (groundwater + Aero Coach electroplating effluents)

Anaerobic conditions were maintained during treatability studies to get an effective Cr(VI) bioreduction. After 2 weeks, pH buffer 0.375g/Liter solution was added to all respective microcosm test solutions to maintain appropriate pH for through microbial growth and remediation performance. Over period of about a week yellow color microcosm test solutions were turned to black which is due to iron reduction and anaerobic conditions attained. Also, typical fermentation odor observed upon color changes to black color which is a typical phenomena of anaerobic microbial process. Here, analysis was carried out with standard laboratory analytical procedures, especially chromium analysis was carried out by atomic absorption and compared with Inductively coupled plasma spectrometer (ICP- OES varian 720 - ES) and with spectrophotometer.

3.3. Microcosm Test Results

Microcosm test solution and control sample analysis was carried out for pH, hexavalent chromium, dissolved oxygen, oxidation reduction potential, chemical oxygen demand, total dissolved solids, and conductivity over a period of 2 weeks, 4 weeks and 6 weeks and summarized in Table 3.1. From the Table 3.1 it can be seen that Anaerobic conditions are met based on the dissolved oxygen decrease and negative oxidation reduction potential data.



Picture 3.6. Comparison microcosm test one month after nutrients and pH buffer added to hexavalent chromium contaminated water with control (yellow color water on the left side of the picture)

Here, hexavalent chromium is reduced to 0.78mg/l from initial 10.31 mg/l and after 4 weeks time hexavalent chromium was non-detectable. Which is a clear indication that bioremediation is taking place here and applicable for this kind of waters/sites remediation, where dig and dispose is not an option in industrial estates. Chemical oxygen demand is high at starting point of microcosm test due to nutrients addition and over a period of time it came down as shown in Table 3.1.

Table 3.1: Microcosm Test Analysis Data for Test and Control for 2, 4, and 6 weeks

No	Parameter	Unit	0-day	Test-2 weeks	Control-2 weeks	Test-4 weeks	Control-4 weeks	Test-6 weeks	Control-6 weeks
1	pH		6.5	6.2	6.47	6.4	6.41	6.48	6.37
2	Hexavalent chromium	mg/l	10.31	0.78	10.24	<0.005	10.19	<0.005	10.12
3	Dissolved Oxygen	mg/l	8.1	0.3	7.2	0.5	5.7	0.9	4.5
4	Oxidation Reduction Potential	mv	+189	-320	+149	-110	+116	-90	+95
5	Chemical Oxygen Demand	mg/l	10	680	10	320	10	80	10
6	Total Dissolved Solids	mg/l	2,610	2,630	2,140	2,940	2,130	2,960	2,130
7	Conductivity	mS/cm	3.68	3.62	3.08	4.19	3.05	4.22	3.06

3.4. EDC-M Microcosm Test Result of Heavy Metals by Cuncolim Industrial Estate Test Well Groundwater's

In addition to above microcosm test using Bethora Industrial Estate test well water and Aero Coach chromium electroplating effluents, we have also carried out microcosm test for Cuncolim CC-5 test well waters. CC-5 Test well water was collected using bailer and transported to the Goa State Pollution Control Board laboratory to run the microcosm tests. Here, 2 liters of CC-5 test well water transferred in to 2 numbers of Borosil glass bottle and 0.75 gram/liter EDC-M (EDC-M1 and EDC-M2) dissolved and further 0.75g/l pH buffer was added to each of the bottle (Black color bottles). One control (blank) sample of 2 Liter in Borosil glass (transparent bottle on the right side of the picture 3.7) bottle kept as a reference without adding EDC-M and pH buffer. After one week 0.375g/l pH buffer was added to both microcosm test samples only and thoroughly mixed to maintain optimum pH of the medium for through microbial growth and sustainability.



Picture 3.7. Microcosm of Cuncolim Industrial Estate Groundwater After 5 Weeks of Test Period

After 5 weeks, microcosm test sample and control sample were sent for 3rd party analysis and data is summarized in Table 3.2. Microcosm test results in Table 3.2 shows that some metals were remediated partially such as Mercury, Nickel and Zinc. However, we could not apply EDC-M onsite pilot study for hexavalent chromium remediation as there was not much hexavalent chromium in Bethora or Cuncolin industrial estate groundwater's which was scope of our initial plan.

Table 3.2. Analysis data of Cuncolium Groundwater's Microcosm Test

No	Parameter	Unit	Initial	Test-5 weeks	Control-5weeks
1	pH		4.67	6.39	5.65
2	ORP	mv	+128	-110	128
3	Total Dissolved Solids	mg/l	290	1,250	280
4	Conductivity	mg/l	0.42	1.81	0.42
5	Copper (Cu)	mg/l	0.291	0.114	0.105
6	Fluoride (F)	mg/l	0.07	BDL	0.18
7	Mercury (Hg)	mg/l	0.004	0.001	0.005
8	Cadmium (Cd)	mg/l	0.0194	0.020	0.022
9	Arsenic (As)	mg/l	BDL	ND	ND
10	Lead (Pb)	mg/l	BDL	BDL	BDL
11	Zinc (Zn)	mg/l	1.89	1.685	1.814
12	Hexavalent Chromium (Cr(VI))	mg/l	0.009	0.01	0.01
13	Sulphate (SO4--)	mg/l	37.3	16.65	13.07
14	Manganese (Mn)	mg/l	0.05	1.94	1.92
15	Nickel (Ni)	mg/l	0.062	0.015	0.026
16	Trivalent Chromium (Cr(III))	mg/l	0.001	BDL	BDL
16	Iron (Fe)	mg/l	0.03	2.00	0.020
18	Cobalt (Co)	mg/l	0.024		

*Groundwater used for above microcosm test is from CC-5 test well which is located in front of Sunrise Zinc Dump Site.

4. Chromium Electroplating Wastewater Treatment by Ion-Exchange Resins and Chromium(VI)

4.1. Introduction

In recent years, environmental contamination with organics and inorganics (heavy metal ions) has been growing public concern because of their toxicities in relatively low concentrations and tendency to bioaccumulate. Hexavalent chromium is on the top-priority list of US environmental protection agency. Chromium exists in nature most frequently in two oxidation states in solution such as trivalent chromium/Cr(III) and hexavalent chromium/Cr(VI). Water pollution by chromium is mainly a result of both various industrial processes such as electroplating, steel production, leather tanning, wood preservation, textile industries, chrome chemicals manufacturing, and mining which contaminates soil and groundwater water and also chromium occurs in nature. In general, hexavalent chromium or Cr(VI) exists in wastewater as oxyanions such as chromate (CrO_4^{2-}) and dichromate ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). Hexavalent form of chromium is highly soluble in water, toxic, carcinogenic, mutagenic in nature and about 100-1,000 times more toxic than the trivalent form. The reduction of Cr(VI) from wastewaters to an acceptable limit before discharging them in to streams and rivers is very crucial for human health and environment as they cannot be degraded but stabilized (by bioremediation especially applicable for subsurface soils and groundwater), as a result they do exist in all parts of environment. The discharge limit of Cr(VI) from effluent is 0.1mg/l and potable water permissible limit is 0.05mg/l. If a living organism is exposed to chromium (VI) beyond the permissible limits it can cause liver damage, pulmonary congestion, edema, and cause skin irritation resulting in ulcer formation. Therefore it is obligatory for industries to decrease the chromium (VI) concentration in their effluents/wastewater to an allowed level before discharging into municipal sewers or rivers. Effluents discharge standards including plating effluents are summarized in Table 4.1 & Table 4.2.

Cr(VI) used in electroplating are Chromium plated parts which are widespread in our everyday life and serve a lot in functional decorative purposes, namely corrosion protection or conversion coatings. Almost all chromium layers are obtained by electro-deposition from a solution of chromic acid and sulfuric acid and possibly additives on metallic and non-metallic surfaces.

Chromic acid containing waste effluents are generally treated by combination of Physicochemical methods such as acidification (H_2SO_4), chemical reduction by sulfites such as Na_2SO_3 , NaHSO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, SO_2 or Fe(II) salts at $\text{pH} < 2.5$ and neutralize with lime followed by sludge separation and disposal. Other treatment methods for Cr(VI) removal are ion-exchange, evaporation,

membrane techniques, and bioremediation (as we have discussed before in this report). Among above treatment methods ion-exchange resin is one of the best available technologies being applied for treating electroplating wastewater.

Table 4.1. General Standards for Discharge of Environmental Pollutants Part-A: Effluents, The Environmental Protection Rules, 1986, Schedule-VI

No	Parameter	Unit	Inland Surface waters	Public Sewers	Land for Irrigation	Marine coastal areas
1	Suspended Solids	mg/l	100	600	200	100 (process wastewater)
2	pH Value		5.5 to 9.0	5.5 to 9.0	5.5 to 9.0	5.5 to 9.0
3	Oil & grease	mg/l	10	20	10	20
4	Total residual chlorine	mg/l	1	NA	NA	1
5	Ammonia Nitrogen (N)	mg/l	50	50	NA	50
6	T-Kjeldahl Nitrogen (NH ₃)	mg/l	100	NA	NA	100
7	Free ammonia (NH ₃)	mg/l	5	NA	Na	5
8	BOD (3 days at 27°C)	mg/l	30	350	100	100
9	COD	mg/l	250	NA	NA	250
10	Arsenic as As	mg/l	0.2	0.2	0.2	0.2
11	Mercury as Hg	mg/l	0.01	0.01	NA	0.01
12	Lead as Pb	mg/l	0.1	1	NA	2
13	Cadmium as Cd	mg/l	2	1	NA	2
14	Hexavalent Chromium	mg/l	0.1	2	NA	1
15	Total Chromium as Cr	mg/l	2	2	NA	2
16	Copper as Cu	mg/l	3	3	NA	3
17	Zinc as Zn	mg/l	5	15	NA	15
18	Selenium as Se	mg/l	0.05	0.05	NA	0.05
19	Nickel as Ni	mg/l	3	3	NA	5
20	Cyanide as CN	mg/l	0.2	2	0.2	0.2
21	Fluoride as F	mg/l	2	15	NA	15
22	Dissolved Phosphate	mg/l	5	NA	NA	NA
23	Sulphide as S	mg/l	2	NA	NA	5
24	Phenolic compounds	mg/l	1	5	NA	5
25	Alpha emitter	Cur/ml	10(-7)	10(-7)	10(-8)	10(-7)

26	Beta emitter	Cue/ml	10(-6)	10(-6)	10(-7)	10(-6)
27	Bioassay (100% effluent)		90% fish survival-96 hrs	90% fish survival-96 hrs	90% fish survival-96 hrs	90% fish survival-96 hrs
28	Manganese as Mn	mg/l	2	2	NA	2
29	Iron as Fe	mg/l	3	3	NA	3
30	Vanadium as V	mg/l	0.2	0.2	NA	0.2
31	Nitrate Nitrogen	mg/l	10	NA	NA	20

NA: Not Applicable

Table 4.2. Chromium & Nickel Plating Effluents Standards comparing with Effluents Standards for Inland Waters. MoEF Part II-Sec.3(i), 2012, Electroplate, Anodizing Industry & General effluents.

No	Parameter	Unit	Electroplating	Effluents Standards for inland waters
1	pH		6.0 to 9.0	5.5 to 9.0
2	Oil and Grease	mg/l	10	10
3	Suspended Solids	mg/l	100	100
4	Total Metals	mg/l	10	Standards for each metal
5	Trichloroethylene	mg/l	0.1	--
6	Ammonical Nitrogen as N	mg/l	50	50
7	Nickel as Ni	mg/l	3	3
8	Hexavalent Chromium, Cr(VI)	mg/l	0.1	0.1
9	Total Chromium as Cr	mg/l	2	2
10	Sulfide as S	mg/l	2	2
11	Sulfate as SO ₄ ²⁻	mg/l	400	--
12	Phosphate as P	mg/l	5	5
13	Copper as Cu	mg/l	3	3

5. Hexavalent Chromium Removal from Aero Coach Plating Wastewater of Bethora Industrial Estate by Ion-Exchange Resins

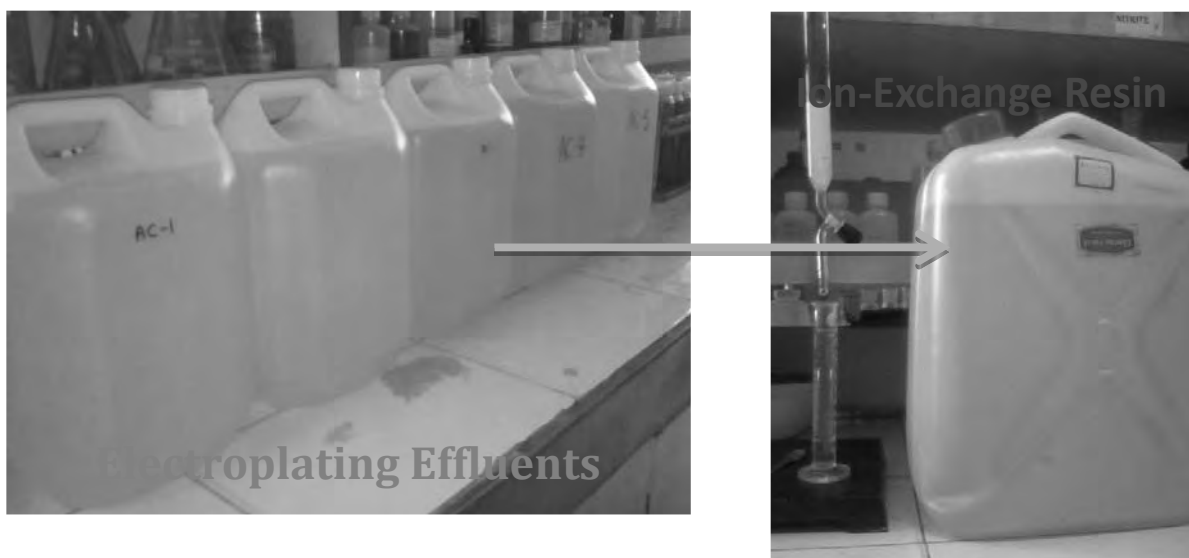
5.1. Aim

Ion-exchange removal of chromium from chromium electroplating wastewater to below permissible limit ($<0.05\text{mg/l-Cr(VI)}$).

5.2. Ion-Exchange Resin Laboratory Test Method

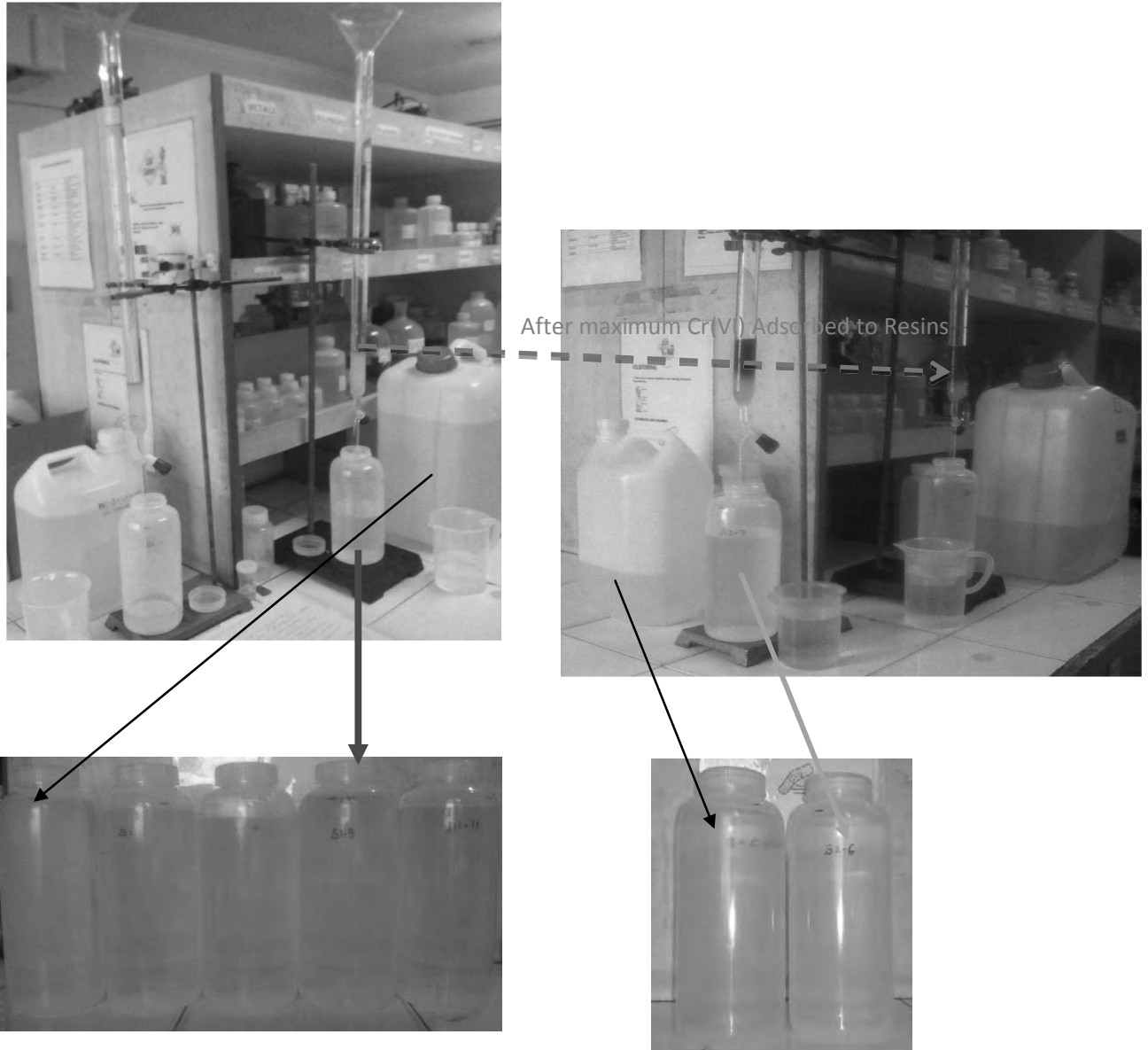
Hexavalent Chromium wastewater was obtained from Aero Coach electroplating facility in Bethora Industrial Estate, where 30L wastewater was transported to the laboratory for ion-exchange resins laboratory tests. Out of 30 liters, 10 liters wastewater separated and dissolved more hexavalent chromium using dichromate salt for comparing low and high concentration hexavalent chromium removal efficiency by ion-exchange resins. Tests were carried out taking 20ml each ion-exchange resin in to two glass columns and rinsed resins with distilled water as shown in picture 5.1. Then started passing low concentration and high concentration chromium(VI) water in above two columns separately at flow rate of 21ml/minute for high Cr(VI) concentration and 42ml/minute for low Cr(VI) concentration.

Here, analysis was carried out with standard laboratory analytical procedures, especially chromium analysis was carried out by atomic absorption and compared with Inductively coupled plasma spectrometer (ICP- OES varian 720 - ES) and with spectrophotometer.



Picture 5.1. Electroplating Effluents Mixed in One Tank and Ion-Exchange Resin Column Study

Laboratory Ion-Exchange Resin Column Tests



Picture 5.2. Ion-Exchange Resin Treatment of hexavalent Chromium Plating Wastewaters, Low and High Concentration of Chromium Solutions

5.3. Ion-Exchange Resin Laboratory Test Results

Ion-exchange treated water samples were collected in 1 liter polypropylene bottle for each sample collection at lower hexavalent chromium solutions and for higher hexavalent chromium solutions separately, and analyzed for pH, chromium, conductivity, etc. and summarized in Table. 5.1 and 5.2. Based on the analysis data of before and after treatment of chromium plating wastewater, it can be seen that hexavalent chromium was removed below detection limits and pH was resulted above 6.0 which is treated effluents dischargeable range. This Laboratory test is confirmation for ion-exchange resin used here can be applied for Aero Coach chromium plating wastewater treatment to remove hexavalent chromium from chromium plating effluents. In addition we have also tested ion-exchange resin for the chromium treatment capacity in column studies to find out ion-exchange unit total treatment capacity at given hexavalent chromium concentration by actual wastewater. Here, we have observed that 20ml of resin was treated 20 liter of 3.84mg/l Chromium (VI) solution. This shows that 150 liter ion-exchange resin unit installed in Aero Coach can treat 150,000 liters of 3.84mg/l chromium wastewater by the ion-exchange resin unit installed.

Table 5.1. Chromium(VI) Removal from Plating Effluents by Ion-Exchange Resins at Low Concentration

No	Parameter	Unit	Before treatment	After IX treatment	Effluent Discharge limits
1	pH		5.8	6.1	6.0 – 9.0
2	Chromium (VI)	mg/l	3.84	<0.005	0.1
3	Nitrate (NO ₃ ⁻)	mg/l	3.8	0.4	50
4	Sulphate (SO ₄ ²⁻)	mg/l	47.2	4.1	400
5	Chloride (Cl)	mg/l	58.6	71.4	--
6	Conductivity	mS/cm	0.53	0.54	--

Table 5.2. Chromium(VI) Removal from Plating Effluents by Ion-Exchange Resins at High Concentration

No	Parameter	Unit	Before treatment	After IX treatment	Effluent Discharge limits
1	pH		5.6	6.05	6.0 – 9.0
2	Chromium (VI)	mg/l	80	<0.005	0.1
3	Nitrate (NO ₃ ⁻)	mg/l	3.4	0.8	50
4	Sulphate (SO ₄ ²⁻)	mg/l	45.7	8.3	400
5	Chloride (Cl)	mg/l	61.3	146.7	--
6	Conductivity	mS/cm	0.63	0.63	--

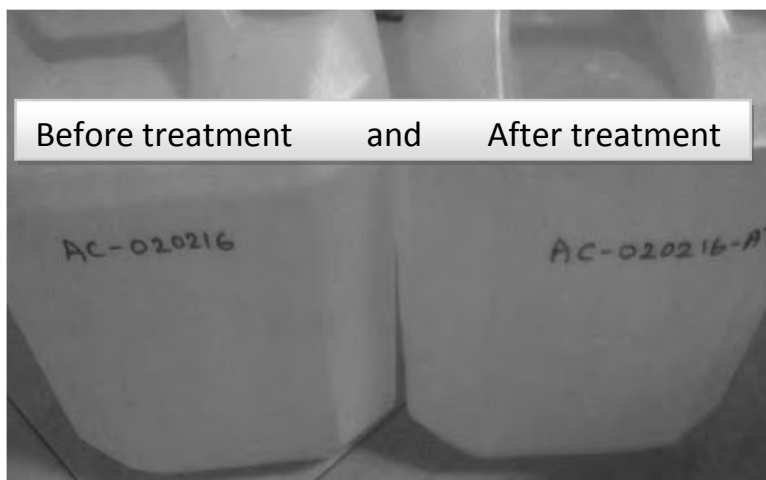
6. Ion-Exchange Resin Unit Installation and Demonstration/Operation in Aero Coach, Bethora Industrial Estate

6.1. Installation and Operation of Ion-Exchange Resin Unit in Aero Coach Electroplating Facility

We have studied thoroughly all the electroplating facilities in Bethora industrial estate for their application of chromium in their electroplating process and found hexavalent chromium used by the plating facilities. Also, we have found hexavalent chromium in nullahs (surface waters). Later we have installed an ion-exchange resin unit in one of electroplating facility in Bethora industrial estate upon hexavalent chromium analysis carried out over a period of time, where we have found chromium(VI) concentration in their plating wastewater of 5-10mg/l and continuously tested for treatment of wastewater onsite. Here, ion-exchange unit consists of 500L plastic tank, water pump, 5 micron and 10 micron filters with housing, 2 ion-exchange resin columns with chromium removal resin of 150L, flow meter, piping and generator and step down transformer as shown in Picture 6.1. Upon installation of ion-exchange unit we have collected electroplating wastewater before treatment for analysis and run ion-exchange unit collecting treated water for the analysis.



Picture 6.1. Ion-exchange unit for electroplating wastewater treatment installed in Aero Coach



Picture 6.2. Chromium Plating Effluents (AC-020216) & After Ion-Exchange Treatment AC-020216-AT

6.2. Ion-Exchange Resin Unit Test Results

Electroplating wastewater samples were collected at initial and after ion-exchange resin treatment on 1st day and after 5 weeks of unit operation and the analysis data is summarized in Tables 6.1, 6.2 and 6.3. This data shows that chromium removed to below detection limits from electroplating effluents of Aero Coach. In addition, nitrate, sulfate, phosphate also removed. Picture 6.2 shows the chromium plating wastewater before and after ion-exchange resin treatment.

Table 6.1. Aero Coach electroplating wastewater before and after ion-exchange treatment vs. effluents standards upon installation of ion-exchange unit.

No	Parameter	Unit	Standard	Before treatment	After IX treatment
1	pH		6.0 to 9.0	5.8	6.1
2	Fluoride (F)	mg/l	--	BDL	BDL
3	Nitrate (NO ₃ ⁻)	mg/l	50 (as N)	4.26	0.27
4	Phosphate (PO ₄ ⁻⁻⁻)	mg/l	5 (as P)	0.11	0.008
5	Zinc (Zn)	mg/l	--	2.34	2.29
6	Chromium(VI)	mg/l	0.1	2.88	BDL
7	Chromium(III)	mg/l	2.0	3.54	BDL
8	Sulfate (SO ₄ ⁻⁻)	mg/l	400	44.1	0.53
9	Total Organic Carbon	mg/l	10 (oil & Grease)	2.68	2.61
10	Total Dissolved Solids	mg/l	--	360	370
11	Conductivity	mS/cm	--	0.53	0.54

BDL: Below detection limit, IX: Ion-Exchange resin

Table 6.2. Aero Coach electroplating wastewater before and after ion-exchange treatment vs. effluents standards 5 weeks after installation of ion-exchange resin unit.

No	Parameter	Unit	Standard	Before treatment	After IX treatment
1	pH		6.0 to 9.0		
2	Fluoride (F)	mg/l	--	1.22	1.46
3	Nitrate (NO ₃ -)	mg/l	50 (as N)	9.88	0.95
4	Phosphate (PO ₄ ---)	mg/l	5 (as P)	17.84	5.95
5	Zinc (Zn)	mg/l	--	2.29	2.29
6	Chromium(VI)	mg/l	0.1	2.02	0.01
7	Chromium(III)	mg/l	2.0	1.51	0.01
8	Sulfate (SO ₄ --)	mg/l	400	7.43	BDL
9	Total Organic Carbon	mg/l	10 (oil & Grease)	2.73	2.7

BDL: Below detection limit, IX: Ion-Exchange resin

Again Aero Coach effluents/wastewater before and after treatment by Ion-exchange resin unit was monitored for basic parameters and pack (color) test for chromium(VI) on 16th February 2016 (after 7 weeks) in Aero Coach and data is summarized in Table 6.3.

Table 6.3. Aero Coach Electroplating Wastewater Before and After Ion-Exchange Treatment vs. Effluents Standards 7 Weeks After Installation of Ion-Exchange Resin Unit.

No	Parameter	Unit	Standard	Before treatment	After IX treatment
1	pH @ 30.7°C		6.0 to 9.0	6.06	6.03
2	Chromium(VI) by pack test	mg/l	0.1	>1.0	<0.05
3	Total Dissolved Solids	mg/l	--	530	530
4	Conductivity	mS/cm	--	0.78	0.77

Appendix

Unit Specification, Operation and Maintenance Information of chromium(VI), Related Heavy Metals, Anions Contaminated Groundwater Treatment Unit

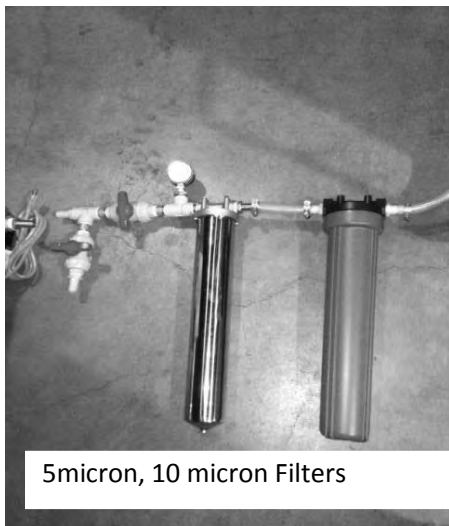
1. Basic Specifications of Ion-Exchange Unit

Basic configuration: two ion-exchange columns, cart for columns, submersible pump, filter housing and micron filters	
Ion-exchange columns	
Recommended hexavalent chromium concentration in effluents	<100mg/l
Required	
Amount of ion-exchange Resin	150 Liters (75 Liters x 2 columns)
Unit Size	φ338×H1,400
Treatment Flow rate	5 - 15 Liter/Minute
Pressure	<1.0 MPa (10 bar)
Operating pressure	0.05~0.2MPa
Vacuum	>0.017MPa (127mmHg)
Column Material	Polyethylene FRP
Accessories	
Ion-exchange column cart	Steel material
Suspended Particles removal	Filter housing
	5, 10 micron filter
Gross Weight	200kg (ion-exchange columns with resin & Cart)
Maintenance	
Filters	Filter change when pressure increases/flow reduces in the unit
Ion-exchange resin	Check hexavalent chromium at outlet regularly and change ion-exchange resin or regenerate resin when target hexavalent chromium raises from recommended levels (0.05mg/l)
Treatment capacity of the unit	

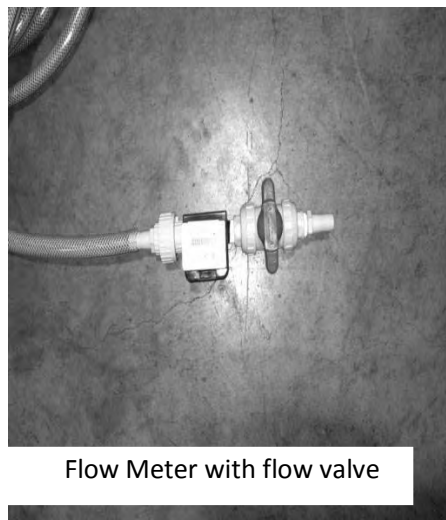
2. Piping of the Ion-Exchange Unit

Connect piping using mostly plastic piping materials applying teflon seal tape and tight with hand and use spanner when essential and make sure that there are no water leakages all along the water treatment unit. When leakage appears stop pump and close all respective bulbs and open air vent (sampling port or at filter housing vent) and open leakage point, apply Teflon seal and refit it thoroughly.

- 1) Take out the filter housing and 5 and 10 micron filters from the card box
- 2) Place the 5 and 10 micron in each housing and close it properly
- 3) Fix the pressure gauge on top of each filter housing
- 4) Connect filter housing to ion-exchange column-1
- 5) Put 75 liters of ion-exchange resin in each column x total two columns and make piping with pressure gauge and sampling port.
- 6) Connect the effluents/wastewater supply to the filter housing-INLET
- 7) Connect filter housing OUTLET to the column-INLET
- 8) Connect End of the column/OUTLET to the flow meter
- 9) Check the sampling port in-between the columns is properly closed
- 10) Put pump or piping connected to pump in to the effluent water, Open the bulb of effluent water passing through filter and ion exchange column while pumping at 5-10 Liter/minute flow rate



5micron, 10 micron Filters



Flow Meter with flow valve



Chromium Water Treatment Unit

3. Cartridge Filter replacement information sheet

Replace micron filter when pressure in the system reaches 1.5-2.0kg/cm²

- 1) Turn off pump and close the bulb
- 2) Close the bulbs of filter housing in and out
- 3) Put the water intake tank under the filter & slowly release filter housing bulb at the bottom of filter.
- 4) Slowly release the vent at the top of the filter housing
- 5) Open filter housing and replace with new 5 and 10 micron filters respectively in two filter housings.

4. Ion-exchange unit regeneration or replacement upon column exhaustion

Check the quality of treated water for chromium(VI) at final water outlet/sampling port and when chromium(VI) is found >0.04mg/l regenerate the column and replace the ion-exchange unit. Contact Asahi Geosurvey or EcoCycle Corporation or its representative/consultant in India for further details

Dr. P.Sreenivasulu Reddy
464, Vasanth Nagar, Kukatplally, Hyderabad-85
Mobile: +91-95732-10032

- 光触媒反応による六価クロム浄化有効性実証試験
報告書

光触媒反応による六価クロム浄化有効性実証試験

@インド共和国ゴア州汚染管理局

(Goa State Pollution Control Board: BSPCB)

内容

はじめに.....	3
クロム濃度の測定方法.....	4
六価クロムの定量.....	4
試験溶液の準備.....	4
光触媒をコーティングした基板の選択.....	4
実験方法.....	4
結果および光触媒反応による六価クロム除去の確認.....	5
次のステップ.....	7
光触媒ビジネス展開の可能性.....	10
図 1 六価クロム除去率の経時変化と溶液の初期 pH の関係.....	6
表 1 光触媒反応による溶液 pH の変化.....	6
写真 1 インド・ゴア州汚染管理局 (GSPCB) での使用実験機器.....	8
写真 2 インド・ゴア州汚染管理局 (GSPCB) での使用実験機器.....	8
写真 3 インド・ゴア州汚染管理局 (GSPCB) での実験開始前の打ち合わせ時.....	9

はじめに

インドでは、地下水を含む水質悪化が問題になっている。特に、河川や地下水の汚染が飲料水に悪影響を及ぼしている。汚染源の一つに六価クロムがある。六価クロムは、皮なめし工程やメッキ工程で使用されているが、不適切な溶液や残渣の処理により、環境汚染問題を引き起こしている。

クロムには、三価と六価の化学種として存在する。六価クロムには発がん性があり、人の健康に甚大な被害を及ぼすことが知られている。六価クロムは、可溶性の陽イオンであり、土壌や吸着剤に吸着され難いため、地下水などに拡散しやすい特徴がある。一方、三価クロムは、土壌や吸着剤に吸着しやすい性質がある。そのため、六価クロムを三価クロムに還元し、凝集沈殿による除去が一般的であるが、六価クロムを三価クロムに還元するために化学薬品を添加することにより、環境への負荷が懸念されている。そのため環境負荷の少ない浄化方法が求められていた。

近年、アナターゼ型酸化チタンの光触媒性を利用した環境浄化が研究されている¹。酸化チタンは、通常、粉末のため、水中に懸濁させる方法が一般的であるが、浄化後酸化チタン粉末を回収することが必要である。この問題を解決する方法の一つとして、酸化チタンをガラスやガラスビーズやセラミックにコーティングすることができれば、使用後の酸化チタンの回収をしなくても済む利点がある。

福岡大学工学部名誉教授中野勝之チタニア LLP 代表が、酸化チタン（凜光²、チタニア-シリカ）をガラスやセラミックにコーティングすることに成功した。このチタニア-シリカ光触媒の特徴は、光触媒のシラノール基がガラス表面のシラノール基との相互作用により、密着性、耐久性が高いと考えられている³。

本実証試験では、中野勝之名誉教授が開発した光触媒（酸化チタン、凜光）コーティングしたプレートを用いて、インド共和国ゴア州汚染管理局（Goa State Pollution Control Board: GSPCB）の試験室でベンチスケールでのフィールドサンプルから六価クロムの除去効果を検証する。

¹ 佐伯和利、門野由美子、鍋島綾貫子、「光触媒反応を利用した低濃度 6 価クロムの除去」
九大農学芸誌 (Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.) 第 64 巻 第 1 号 37-43 (2009)

² <http://www.rinkoh.com/>

³ 梅田彰、多田真由子、「チタニア-シリカ複合光触媒液「ツルクリーン」」、東亜合成グループ研究年報 34 TREND0 2009 第 12 号

クロム濃度の測定方法

六価クロムの定量

六価クロム濃度の測定は、株式会社 共立理学研究所のパックテストのジフェニルカルバジド比色法を用いる。(写真 1 参照) 測定可能濃度範囲は、0.05~2mg/L である。

試験溶液の準備

- 重クロム酸カリウム ($K_2Cr_2O_7$) から Cr^{6+} の濃度約 1mg/L を作成し、これを基準溶液 (Std) とする。
- フィールドからのサンプルは、希釈して、 Cr^{6+} の濃度約 1mg/L に調整する。これをフィールドサンプル (FS) とする。
- pH の調整は、HCl または NaOH を使用する。

光触媒をコーティングした基板の選択

光触媒をコーティングした基板は、セラミックスプレート、スチールプレート、ガラスプレートの 3 種類を準備した。本試験にて最も適した基板を選択して、実験を行う。

基板の選択方法は、光触媒の検証実験を行い、 Cr^{6+} の除去に悪影響を及ぼさないもの、または光触媒の機能を妨げないなどを考慮して、選択をする。選択された基板を利用する光触媒システムを利用して、本実験を行うこととする。

検証結果

- セラミックスプレート
判定：不適切
理由：セラミックスプレートから溶出する不純物が Cr^{6+} の還元を妨げる可能性があるから
- スチールプレート
判定：不適切
理由：ゴアの高湿多湿の気候の影響により、スチールプレートの表面に比較的短期間に錆が生じた。錆は、 Cr^{6+} の還元を妨げる原因であり、かつ、パックテストのジフェニルカルバジド比色法での阻害剤となり得るから
- ガラスプレート
判定：良好。特に問題がないので、光触媒をコーティングしたガラスプレートを本実験に利用する。

実験方法

凜光コーティングガラス (5cmx5cm) 凜光は両面にコーティングしたものを利用する。

250mL のビーカーに光触媒をコーティングガラスおよび殺菌ランプ (254nm、6.3W) を

入れ、150mL の試験溶液を入れる。ガラスプレートと殺菌ランプの距離は、約 2cm である。

(写真 2 参照)

紫外線照射時は、スターラーで溶液を攪拌した。紫外線照射にともなう溶液の温度上昇からの蒸発およびパックテストのサンプル採取における溶液の減少については、補正は行わないこととする。

pH2.5 に調整した基準液 (Std.) 150ml、pH は 2.5、5.0、6.8 および 9.9 のフィールドサンプル溶液 (FS) 150ml を各々準備する。pH の調整は、必要に応じて、HCl または NaOH を加えて行う。

調整された溶液は、250ml のビーカーに移し、UV ランプにより紫外線を照射する。溶液は、マグネティックスターラーにより攪拌する。六価クロムの濃度は、スタート (UV ライトからの紫外線照射前) 0 分、紫外線照射後 30 分、60 分、120 分、180 分、240 分、300 分毎に溶液を 2m l 採取し六価クロムの濃度と pH の測定をする。

(注：容器の採取および溶液の蒸発による溶液の減少分については、補正を行わないこととする。UV ランプの熱による溶液の温度上昇について、温度の調整は行わないこととする。溶液の pH の調整は行わないが、pH は測定する。)

結果および光触媒反応による六価クロム除去の確認

結果

- 基準液およびフィールドサンプル溶液に光触媒をコーティングしたプレートを入れたものに紫外線を照射しないサンプルを準備し、六価クロム濃度変化を確認した。紫外線を照射しないサンプルの六価クロムの濃度には変化がなかった。
- 紫外線を照射した基準溶液およびフィールドサンプルを pH が 2.5 に調整し、各々の六価クロムの濃度が、240 分後に六価クロム濃度の検出限界 (0.05mg/L) 付近に達した。300 分後には、完全に検出限界を超えたため、測定ができなかった。300 分の時に、溶液のトータルクロムの濃度を測定したが、溶液中にクロムイオンが検出されなかった。そのため、六価クロムが光触媒反応により還元され、光触媒上に析出されたと考えられる。
- pH の影響
光触媒の pH 依存性は、紫外線が照射された光触媒の表面への触媒の格子欠陥などの方面状態や化学物質の吸着などの密接な関連があると考えられる。表 1 から初期濃度がアルカリ性の場合中性に、酸性の場合より酸性に pH がシフトする傾向が見られた。(この理由については、ここでは解析しないこととする。)

表 1 光触媒反応による溶液 pH の変化

	スタート時 (0 分) の pH	300 分後の pH
基準溶液	2.5	2.3
フィールドサンプル pH2.5	2.5	2.3
フィールドサンプル pH5.0	5.0	3.6
フィールドサンプル pH6.8	6.8	4.0
フィールドサンプル pH9.9	9.9	5.0

光触媒反応による六価クロムの除去が確認された。

図 1 から pH (初期濃度) が低いほど六価クロムの除去率が良いことを示す。このことから、溶液を酸性にすれば六価クロムの効果的な還元処理が可能であると言える。

特に、低 pH での六価クロムの除去効率が良い。初期濃度 pH2.5 では、300 分後に六価クロムの分析限界値を下回り、ほぼ 100%除去されたと言える。

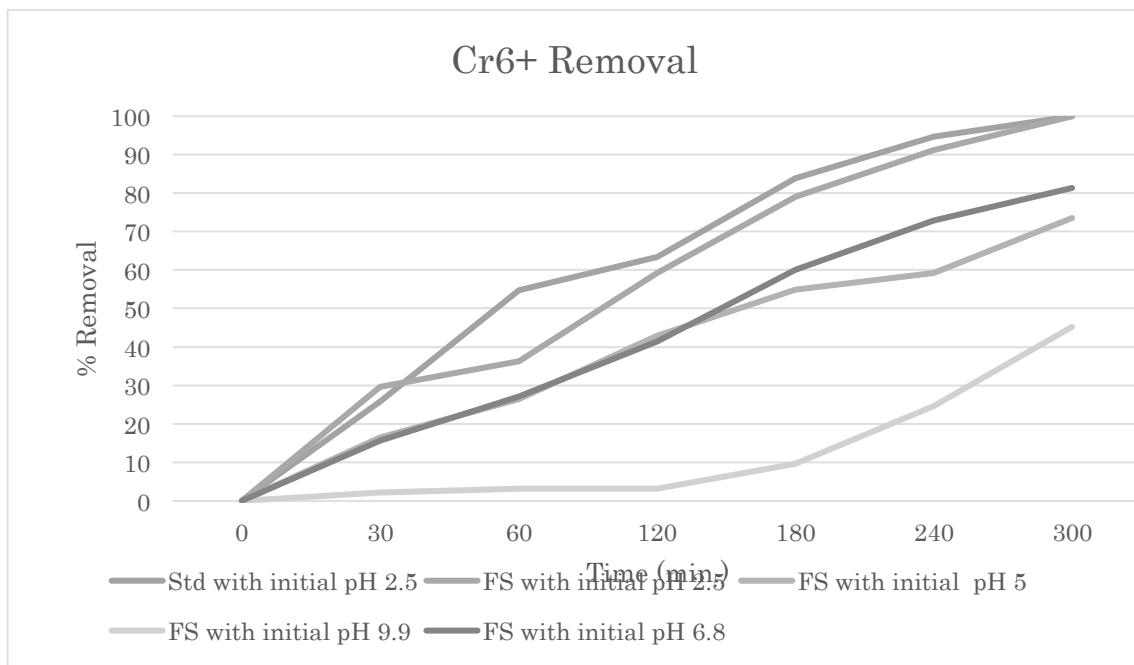


図 1 六価クロム除去率の経時変化と溶液の初期 pH の関係

次のステップ

光触媒が六価クロムの除去において、効果的であることを示すことができた。

コーティングされた光触媒の面積を大きくし、パイロット試験を行うことを推奨する。

光触媒の面積を大きくするためにプレートの代わりに、ガラスビーズを利用することもできる。パイロット試験では、 Cr^{6+} の還元（除去）する際の pH 設定に注意し、さらに、光触媒の耐久性についても確認をすることを勧める。理想的な光触媒システムの設置場所は、ポストレメディエーション（最終浄化ポイント）であるが、これに限定されることはない。一番適した場所に本光触媒システムを設置することができる。

本試験では、 Cr^{6+} の還元にのみフォーカスしたが、その他の化学物質にも有効であることを付け加える

最後に、ゴア州汚染管理局による支援に感謝する。

写真 1 インド・ゴア州汚染管理局（GSPCB）での使用実験機器



写真 2 インド・ゴア州汚染管理局（GSPCB）での使用実験機器



写真 3 インド・ゴア州汚染管理局（GSPCB）での実験開始前の打ち合わせ時
実験をサポートしてくれた GSPCB 職員



光触媒ビジネス展開の可能性

インドの汚染は、工業発展に伴い、悪化している。大気、水、廃棄の問題は社会問題となっている。人の生活に欠かせない飲料水の問題は避けては通れない問題となっている。特に、地下水を水源とする飲料水の汚染問題が特に深刻である。インドの地下水汚染の主な汚染源は、自然由来（ヒマラヤ山系の鉱脈）または工業由来とするヒ素、皮なめし工場などから発生した六価クロム汚染水が地下水に流れ込み深刻な汚染を引き起こしている。

これまでの浄化の課題

- 従来のケミカルを使用する浄化方法では、六価クロムを還元するには大量の化学薬品の使用が不可欠であった。そのため、高額な浄化費用と化学薬品による環境影響の問題があった。
- 従来の光触媒は、分散型であり光触媒粒子を溶液に懸濁させるため、使用済みの光触媒粒子の回収および再利用が困難であった。

チタニア-シリカ光触媒の活用の可能性

可能性①

バイオレメディエーションや化学処理による浄化後の水に含有する低濃度の六価クロムを除去するユニットとしての販売の可能性。バイオレメディエーションシステムなどに組み込むことが可能である。バイオレメディエーションシステムに光触媒ユニットを組み合わせることにより高度な水の浄化が可能になることが期待される。

可能性②

光触媒をコーティングしたフィルター装置の販売。六価クロムなどの有害物質の除去に効果的である。

《補足：光触媒の特徴について、紫外線または太陽光に含まれる紫外線により、六価クロムなどの有害物質が安全な三価クロムに還元されて、その結果六価クロムが水から除去される。（三価クロムは安定物質であり、六価クロムのような毒性はない。）》

可能性③

六価クロム以外の有害物質用フィルターの開発・販売の可能性。（ヒ素や有害有機化合物や大腸菌やレジオネラ菌、黄色ブドウ球菌などに対しても効果がある。）

光触媒を利用する水浄化技術の活用案

- バイオレメディエーションシステムへのポストトリートメント（最終処理）としての光触媒の活用

- 中規模から小規模の水処理施設での最終処理工程での六価クロム除去のための光触媒の活用
- 光触媒による六価クロム除去ユニットを小型化し、家庭用で使用できる水処理装置に組み込むことによる光触媒コーティングフィルターの活用
- 光触媒水処理システムを水産養殖などの水処理装置に組み込んでの活用
- ヒ素の凝集沈殿効率を高めるための光触媒の活用（光酸化作用の活用。光触媒によりヒ素を酸化するため、化学薬品の使用量削減が可能となる。）

上記の活用方法は一例であり、その他にも様々な活用方法が検討されている。

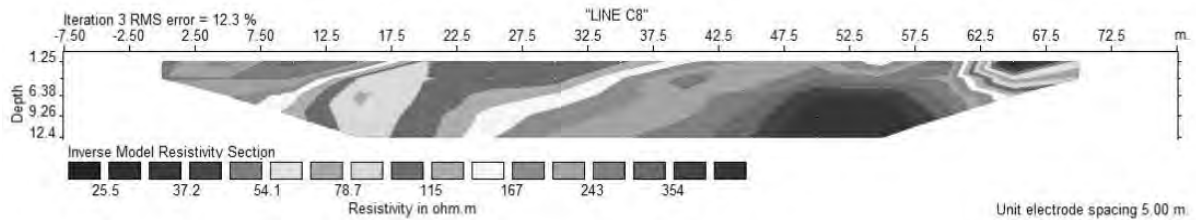
- 井戸設置報告書

(Spetra GeoServices Pvt. Ltd.)

REPORT ON GEOPHYSICAL, HYDROLOGICAL, GEOLOGICAL and GEOBORING INVESTIGATIONS

Bethora and Cuncolim IDC, Goa

Depth mts	Csg	GW	Borelog	Moisture/ GW table
0-1				
1-2				
2-3				
3-4				dry
4-5				dry
5-6				dry
6-7				dry
7-8				
8-9				
9-10				moist
10-11				moist
11-12				moist
12-13				GW Table1/2"
13-14				GW Table1"
14-15				
15-16				moist
16-17				moist
17-18				No GWT >1"



(During 28th Feb 2015 to 08th April 2015)



Asahi Geo Survey Company Limited
3-40-5, Sendagaya, Shibuya-ku,
Tokyo 151-0051,
JAPAN
Ph: +81 3 3478 7216



SPECTRA
GeoServices

Spectra Geoservices Pvt. Ltd.
72, Sancharapuri, New Bowenpally,
Secunderabad – 500011,
India.
Ph: +91 40 40033186

EXECUTIVE SUMMARY / DECLARATION

Detailed Electrical resistivity Imaging (ERM) surveys are carried out on **eleven** traverses in Bethora IDC and on **Eight** Traverses in Concolim IDC Industrial Estates. The traverses are laid using hand held GPS unit of Garmin Make at all possible sites so that maximum target areas are covered. The traverses are laid in a zig-zag fashion along the roads or nalah directions to identify the sites of best ground water accumulation. Also the depth of the water table and thickness of the water table are ascertained in these surveys. For resistivity surveys we used DC resistivity meter of **IGIS** make. The data are acquired, processed and interpreted by the undersigned and the report along with the data and retrieved geoelectrical sections are submitted to **Dr P. Sreenivasulu Reddy**, Coordinator.

The results show the contrastive 'low resistivity zones' associated with ground water against 'high resistivity zones' for the over-burden and 'very high values' for the laterites. The Geoelectric sections along the traverses of varying lengths show that the depth of the over burden is around 2 to 4m below the ground. The low resistivity zones are recommended for drilling the core samples.

We further declare that the processing of the data using of the software **RES2dInv** are proven to be the best to our knowledge, nevertheless M/s **Spectra Geoservices Pvt. Ltd.**, Secunderabad or their employees are not directly or indirectly responsible and committed for the profits or losses to be incurred to the Client or their wards, in future years by any means, directly or indirectly.

We had planned to drill one borehole in two days, but the drilling part was completed before the scheduled time, the reasons being as under:

Earlier it was planned to deploy a truck mounted rotary drilling rig. For two reasons we have to switch over to pneumatic drilling rig.

- i) Importantly, at many of the borehole sites there are overhead low - tension electrical cables prevail. With traditional rotary drilling, every time we would simply be spending more time in either disconnecting the electrical connections temporarily or otherwise for erecting the mast because of which we have to face inconvenient situations and unnecessary running around for permissions with authorities to dislocate the over head electrical wires. With pneumatic drilling rig

only 10ft mast has to be raised and the overhead electrical lines problem is solved. More over, pneumatic drilling rig is much faster than the traditional rotary drilling.

- ii) The general geology of Goa consists of hard, massive, highly indurated lateritic rock at the top, followed by a semi-indurated mottled zone comprising of conglomeratic segregations. These zones have vermiform and promote a good vertical drainage of percolating water. They are followed downward by lithomarge clay in which characteristics of the parent rock may still be recognized. Lithomarge is normally expected in South Goan geology at a very shallow depth. This pink clayey strata mass is normally a challenge while drilling as there is very little moisture and it creates a balling effect thereby not only creating a huge collapsible well, but the same does not allow to drill further unless it is flushed out completely.

Of course, the geological problem could have overcome with rotary drilling rig also. But due to the overhead electrical cables, we are forced to engage the pneumatic drilling rig, which saved our time of drilling.

The following table summarizes the outcome of our drilling operations. The proposed and drilled depths, depth of ground water table encountered in each well and rock unit within which ground water encountered are listed.

BH Id	Proposed	Drilled	GW intercepted at (m)	Rock type within which GW noticed
Bethora IDC				
BT 1	15	16	03	Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole
BT 2	15	18	15	"
BT 3	15	18	12	"
BT 4	15	18	14	"
BT 5	15	18	16	"
BT 6	15	16	14	Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole with Fe/Mn dyke
BT 7	15	16	14	Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole

Concolim IDC				
CC1	15	18	12	Within Laterites followed by Basalt
CC2	15	18	09	Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole
CC3	15	18	08	Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole
CC4	15	18	08	Within Laterites followed by Basalt
CC5	15	17	15	Within Basalts fracture zones
CC6	15	15	10	Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole
CC7	15	18	11	"

Initially it was planned to drill three bore holes in Concolim IDC and four boreholes along Sal River bed. But on the request of Client all the seven boreholes are planned in Concolim IDC only

It was initially proposed to drill 105m (seven boreholes) in Bethora IDC, 45m (three boreholes) in Concolim IDC and 40m (four boreholes) in Sal-river bed. But on Client's request seven boreholes of 15m each are proposed (105m) in Concolim IDC itself. That is as per the work order, it was proposed to drill 190m in total for the entire investigations but later on the proposal is changed to 210m (14 bores of 15m each). From the above table it is clear the total drilled depth is about 242m, since we could not intercept the good water table within 15m depth in most of the cases particularly in Bethora IDC. In Concolim IDC, we intercepted basalt, the hard, compact and impervious rock is intercepted below Lateritic clay/ Lithomarge/ Bole, so the boreholes are extended in to basaltic rock in most of the cases.

Project Execution Details

Details of Project execution for sites at Bethora IDC, Cuncolim IDC, GOA		
BETHORA IDC		
Quote Reference No	Activity	Actual Work Content Summary
Bethora IDC Step 1	Hydro-geological exploration (10Ha)	Geological studies of the site(s), topography mapping, resistivity surveys were carried out between 2 nd March to 5 th March 2015 and written in sections 2.1 to 4.6 (page numbers 4 - 18) of the Report.
Bethora IDC Step 2	Draft Report	Processing, interpretation and report writing
Bethora IDC Step 3	DRILLING of 7 bore wells & monitoring Well installation for observations.	Bore wells were drilled in Bethora IDC during 19 th to 22 nd March, 2015 The same is written in sections 1.1 to 1.7 (page number 34) of the Report.
Bethora IDC Step 4	Supervision	Provided as scheduled between 18 th to 22 nd March, 2015
Bethora IDC Step 5	Draft Report	Bore hole logging was carried out immediately after borehole is completed and report prepared and presented in <i>Borehole logs of Bethora.xls</i>
CUNCOLIM IDC		
Cuncolim IDC Step-1	Hydro-geological exploration	Geological studies of the site(s), topography mapping, resistivity surveys were carried out between 6 th March to 8 th March 2015 and written in sections 2.1 to 4.6 (page numbers 4 - 18) of the Report.
Cuncolim IDC Step 2	Draft Report	Processing, interpretation and report writing
Cuncolim IDC Step 3	DRILLING of 3 bore wells & monitoring Well installation for observations	Bore wells were drilled in Cuncolim IDC during 23 rd to 28 th March, 2015 and same is written in sections 2.1 to 2.7 (page number 34) of the Report.
Cuncolim IDC Step 4	Supervision	Provided as scheduled between 23 rd to 29 th March, 2015
Cuncolim IDC Step 5	Draft Report	Bore hole logging was carried out immediately after borehole is completed and report prepared and presented in <i>Borehole logs of Cuncolim.xls</i>
SAL RIVER Borings were moved to CUNCOLIM IDC on Client's request		
Sal River Step-1	DRILLING of 4 bore wells & monitoring Well installation for observations.	Upon the client request these 4 more bore wells drilled in Cuncolim IDC instead of Sal River and monitoring wells were installed between 23 rd to 28 th March, 2015
Sal River Step-2	Supervision	Provided as scheduled between 23 rd to 29 th March, 2015
Sal River Step-3	Draft Report	Bore hole logging was carried out immediately after borehole is completed and report prepared and presented in <i>Borehole logs of Cuncolim.xls</i>
Goa visits	Site visits in advance before Geophysical and borehole works started	Prior to drilling the boreholes, Dr. B.N.Rao, Dr. P.S.Reddy, Dr. Kawakami and Mr. Saifee, Drilling in-

		charge, have visited the sites along with site engineer, between 21 st Jan to 22 nd Jan 2015.
Geo-surveys	Geophysical, geological and topographical surveys	Geophysical, geological and topographical teams carried out surveys in Bethora and Cuncolim during 2 nd to 10 th March 2015.
Bethora IDC and Cuncolim IDC	JCB works site clearance for boring	Sites were made ready for boring and well installation by manual/personals wherever required between 12 th to 14 th March 2015
Bethora IDC and Cuncolim IDC	Bore hole drilling	During drilling and after completion of the boreholes (that is 19 th to 28 th March) the supervising teams were in Goa.
Bethora IDC and Cuncolim IDC	Bore wells caps & RCC structure	14 Test well chambers were constructed between 23 rd March to 4 th April 2015 in Bethora and Concolim (page number 34) of the Report with lock & key, and keys were handed over to the client
Goa visits	Checking of the quality of the drilled bore holes, chambers, well maintenance, lock & key arrangements, etc.	The sites were again visited upon AGS request between 5 th to 7 th April 2015 and made arrangements according to the requests.

Note 1: Bottom caps for sediment trap were not installed based on our previous experience as we have thought that there was no necessary.

Note 2: Due to the presence of overhead low - tension electrical cables at many of the borehole sites, the drilling rig was changed from the traditional rotary drilling to pneumatic drilling. With this, the time for disconnecting the electrical connections and obtaining permissions from the concern are saved and thereby we could complete the drilling part much earlier than the proposed time.

(Dr. B.Narasimha Rao)
Chief Geophysicist &
Managing Director,
Spectra Geoservices Pvt. Ltd

S. No	CONTENTS	Page No
	Executive Summary	i - v
	Contents	1
	List of Figures	2
1	OBJECTIVES	3
2	INTRODUCTION	3
2.1	<i>Location</i>	3
2.2	<i>Administrative and Political set up of South Goa</i>	3
2.3	<i>Physiography & Drainage</i>	4
2.4	<i>Crops & Irrigation practices</i>	5
2.5	<i>Soil Type</i>	5
3	GEOLOGY	6
3.1	<i>Stratigraphy</i>	6
3.2	<i>Distribution of rock types</i>	6
3.3	<i>Laterite</i>	6
4	RESISTIVITY METHODS	7
4.1	<i>Theory</i>	8
4.2	<i>Apparent Resistivity</i>	11
4.3	<i>Instruments and Measurements</i>	11
4.4	<i>Data Acquisition</i>	12
4.5	<i>Wenner-Schlumberger array</i>	15
4.6	<i>Description of results</i>	17
5	BOREWELLS DRILLED IN BETHORA AND CUNCOLIM INDUSTRIAL ESTATES	21
6	SPECIFICATIONS FOR DRILLING	22
6.1	<i>Drilling Procedure</i>	22
6.2	<i>Pneumatic DTH drilling rigs for 200 mm diameter borewell</i>	22
6.3	<i>Blank/ Slotted pipes/ Screens</i>	22
6.4	<i>Well Development</i>	23
6.4.1	<i>Gravel</i>	23
6.4.2	<i>Well Head Protection</i>	24
6.4.3	<i>Maintenance of Drilling Log</i>	24
6.4.4	<i>Bore hole logs and Borewell Details</i>	24
6.4.5	<i>General Geology and observations</i>	25
6.4.6	<i>Structural geology</i>	25
7	GROUND WATER SCENARIOS	26
7.1	<i>Hydrogeology</i>	26
7.2	<i>Occurrence of ground water and aquifer characteristics of various formations</i>	26
7.2.1	<i>Laterites</i>	26
7.2.2	<i>Alluvium</i>	27
7.2.3	<i>Granite and Granite Gneiss</i>	27

7.2.4	<i>Metavolcanics</i>	27
7.2.5	<i>Metasedimentaries</i>	28
8	DEPTHS TO WATER LEVELS	28
8.1	<i>Seasonal ground water level fluctuation</i>	28
8.2	<i>Ground water quality</i>	29
8.3	<i>Ground water related issues & problems</i>	30
9	SOUTH GOA DISTRICT AT A GLANCE	30
9.1	<i>Predominant Geological Formations other than Laterite</i>	30
9.2	<i>Hydrogeology</i>	31
9.3	<i>Ground water quality</i>	31
9.4	<i>Major ground water problems & issues</i>	31
9.5	<i>Seawater ingress</i>	31
10	GENERAL GEOLOGY AND OBSERVATIONS	31
	APPENDIX	33

List of figures	
Figure No	Description
1	Equi-potentials and current lines for a pair of current electrodes A and B on a homogeneous half-space
2	DC Resistivity data acquisition system deployed for site characterization
3	Steps used by (a) Wenner and the (b) Wenner-Schlumberger arrays to increase the depth of investigation
4	Arrangement of datum points in the pseudo-section for (a) Wenner and (b) Wenner-Schlumberger arrays
5	Layout of Traverses in Bathora
6	Geo-electrical sections along Lines B1 and B2
7	Apparent Resistivity contour maps for n = 1, 2, 3, 4 & 5 for B3 to B5 and Geo-electrical sections along Lines B3 and B4
8	Geo-electrical sections along Lines B6 & B7
9	Geo-electrical sections along Lines B8, B9, B10 & B11
10	Layout of Traverses with drilled borehole sites in Cuncolim
11	Geo-electrical Section along Lines C1 and C2
12	Geo-electrical Section along Lines C4, C3, C5
13	Geo-electrical Section along Lines C6, C7 and C8

1 OBJECTIVES

Asahi Geo Survey Co. Ltd., has proposed to conduct the Pilot Survey for Disseminating Small and Medium Enterprises Technologies for Groundwater Remediation by Bioremediation (hereinafter referred to as the “Pilot Survey”) financed and supervised by the Japan International Cooperation Agency (hereinafter referred to as the “JICA”), the executing agency for Official Development Assistance of the Government of Japan. As assistance to Asahi Geo Survey Co Ltd, Spectra Geoservices Pvt. Ltd., Secunderabad, India, is entrusted to carryout Geophysical surveys to select best locales of ground water accumulation, to carryout drilling at the recommended sites and prepare the sites for ground water monitoring & remediation, collect the samples while drilling from the boreholes, packing & labeling, and hand over the same to the concern authorities.

2 INTRODUCTION

2.1 Location

Goa state lies along the west coast of India. The state is sub – divided into two districts, North & South Goa district. South Goa district lies in the southern part of Goa state. The geographical area of the district is 1966 sq.km, and is situated between north latitudes 14° 54' 00” & 15° 29' 30” and between east longitudes 73° 47' 00” & 74° 20' 30”. The district is bounded by Tiswadi, Ponda and Satari taluks of North Goa district in the north, Uttara Kannada district of Karnataka in the east & south, and in the west by the Arabian Sea.

2.2 Administrative and Political set up of South Goa

Madgaon is the district headquarters of South Goa district. The district comprises of 5 taluks namely, Sanguem, Canacona, Quepem, Salcete and Marmugao (Plate 1).



Plate 1 Index Map of South Goa District, Goa

2.3 Physiography & Drainage

Physiographically South Goa district can be broadly divided onto four distinct morphological units from west to east namely,

- (i) coastal plain with marine land forms on the west,
- (ii) vast stretch plains adjoining the coastal plain,
- (iii) low dissected denudational hills & tablelands towards the east, and
- (iv) deeply dissected high Western Ghats denudational hills along the eastern most part of the district.

Principal Perennial River draining through the district is Galjibagh and non – perennial (seasonal) rivers are Sal, Saleri & Talpona. The river basin of westerly flowing Galjibagh river originate from Western Ghats and drain in the Arabian Sea in the west under estuarine environment. Primarily the underlying rocks govern the drainage system in the area. The drainage pattern is generally dendritic type. The river valley is ‘V’ shaped in the western high hill ranges, but broadens in central midlands and become ‘U’ shaped in the low lands and coastal plains.

2.4 Crops & Irrigation practices

Agriculture is one of the important economic activities in the district. Rice is the staple food and paddy is the principal agricultural crop. Gross cropped area under paddy in 2005 – 06 was 22572 ha, accounting for nearly 35.32% of the Gross Cropped Area (63914 ha). Other crops grown are cereals, millets, pulses & oil seeds, which constitute an area of 2147 ha (3.36%), sugarcane 870 ha (1.36%), coconut 14157 ha (22.15%), arecanut 220 ha (0.34%) and cashewnut 14912 ha (23.33%). Irrigation potential created as on March 2000 by the Salauli Irrigation Project was 4614 ha in Sanguem, Quepem and Salcete taluks of South Goa district. Irrigation by different sources, as per Third Census of Minor Irrigation Schemes 2000 – 01 is illustrated in Table 1.

2.5 Soil Type

Soils of the district can be classified into 4 types namely (i) Laterite soil (ii) Saline soil (iii) Marshy soil and (iv) Alluvial soil.

- (i) Lateritic soil is the major soil type in the district. It is highly porous & permeable, slightly acidic with low pH values, low in organic matter, Calcium and Phosphorus.
- (ii) Saline soil in the district occurs in the flood plains of Zuari, Sal, Saleri, Talpona and Galjibagh rivers in Salcete, Marmugao, Quepem and Canacona taluks. It also occurs to a very limited extent in Sanguem taluk. The soil is deep, poorly drained and less permeable. It is saline, high in pH and contains humus and organic matter.
- (iii) Marshy soil occurs to a large extent in Salcete taluk and towards the western part of Canacona taluk. It also occurs in Marmugao taluk. This type of soil occurs in low-lying water logged and tidal affected areas.
- (iv) Alluvial soil occurs as very thin strip along the coastline towards western part of Salcete taluk and also a limited exposure occurs in Canacona taluk. It is reddish brown to yellowish, coarse grained and confined to narrow valleys of rivers. It is well drained, acidic with low pH and organic content.

3 GEOLOGY

3.1 Stratigraphy

The stratigraphic succession of rocks in South Goa district is given as table 1 below:

Table 1: STRATIGRAPHY OF SOUTH GOA DISTRICT

AGE	GROUP	FORMATION	ROCK TYPE
Quaternary			Beach Sand
Cenozoic			Laterites
Upper Cretaceous to Eocene	Deccan Trap		Basalt
Lower Proterozoic	Clospet Granite	Peridotite, Gabbro, Norite	Granite, Pyroxenite, Peridotite, Serpentinite, Gabbro
Archaean to Lower Proterozoic	Goa Group	Vageri Formation	Carbonate-quartz-chlorite schist with Greywacke
		Bicholim Formation	Dolomitic limestone,
			Quartz- Sericite schist
			Banded iron formation
			Chert and quartzite
			Quartz-chlorite-biotite schist with layers of chert, iron oxide, carbonate, metabasalt and meta gabbro
		Sanvordem Formation	Greywacke with conglomerate
		Sanvordem Formation	Quartzite
		Barcem Formation	Quartz-chlorite schist
			Meta-acid volcanics
Metabasalt			
		Orthoquartzite	
Archaean	Peninsular Gneissic		Granite Gneiss, Migmatites and Granites

3.2 Distribution of rock types

South Goa district is dominantly covered by the formation of Goa Group belonging to Dharwar Super Group of Archaean to Proterozoic age. The Goa Group comprises of metamorphic rocks of green schist facies, and is divided into Barcem, Sanvordem, Bicholim and Vageri formation in the ascending order of superposition. The Goa Group of rocks has been intruded by granite gneiss, feldspathic gneiss, hornblende gneiss and porphyritic granite, followed by basic intrusive.

3.3 Laterite

Laterite, a Regolith peculiar to India, is a most widespread Pleistocene formation of the Indian peninsula. In composition, Laterite is a kind of a vesicular clayey rock, composed essentially of a mixture of the hydrated oxides of alumina and iron with often a small percentage of other oxides,

chief among which are manganese and titanium oxides. We have numerous varieties of laterite which have bauxite at one end and an indefinite mixture of Ferric hydroxide at the other. The iron oxide generally preponderates and gives to the rock its prevailing red colours; at places the iron has concentrated in oolitic concretions, at other places it is completely removed leaving the rock bleached, at white or mottled. At some places again the iron is replaced by manganese oxides; particularly in the lateritic cap over the Dharwar rocks.

Usually between the lateritic cap and the underlying basalt or other rocks over which it rests, there is a lithomarge-like rock, or bole, a sort of transitional product showing gradual passage of the underlying rock (basalt or gneiss) into laterite.

Metabasalts are also extensively exposed in Canacona and Marmugao taluks and also as small outcrops in Salcete & Sanguem Taluks. Exposures of greywacke with conglomerate are found to occur in Quepem, Canacona and Sanguem taluks.

Granite gneiss is found to occur in large portion of Salcete taluk and limited exposures are in Quepem, Canacona and Sanguem taluks.

Small outcrops of granite are found to occur in Canacona and Sanguem taluks. During the Sub – Recent and Recent times, the rocks have been subjected to lateritisation of varying thickness. Thus, laterite occurs extensively covering almost all the formations in South Goa district.

Coastal alluvium occurs as thin strip along the coastal plains in western part of Salcete taluka. It consists of fine to coarse sands with intercalations of sandy loam, silt and clay.

4 RESISTIVITY METHODS

Surface electrical resistivity surveying is based on the principle that the distribution of electrical potential in the ground around a current-carrying electrode depends on the electrical resistivities and distribution of the surrounding soils and rocks. The usual practice in the field is to apply an electrical direct current (DC) between two electrodes implanted in the ground and to measure the difference of potential between two additional electrodes that do not carry current. Usually, the potential electrodes are in line between the current electrodes, but in principle, they can be located anywhere. The current used is either direct current, commutated direct current (i.e., a square-wave alternating current), or AC of low frequency (typically about 20 Hz). All analysis and interpretation are done on the basis of direct currents. The distribution of potential can be related theoretically to ground resistivities and their distribution for some simple cases, notably, the case of a horizontally stratified ground and the case of homogeneous masses separated by vertical planes (e.g., a vertical fault with a large throw or a vertical dike).

Mineral grains comprised of soils and rocks are essentially nonconductive, except in some exotic materials such as metallic ores, so the resistivity of soils and rocks is governed primarily by the amount of pore water, its resistivity, and the arrangement of the pores. To the extent that differences of lithology are accompanied by differences of resistivity, resistivity surveys can be useful in detecting bodies of anomalous materials or in estimating the depths of bedrock surfaces. In coarse, granular soils, the groundwater surface is generally marked by an abrupt change in water saturation and thus by a change of resistivity. In fine-grained soils, however, there may be no such resistivity change coinciding with a piezometric surface. Generally, since the resistivity of a soil or rock is controlled primarily by the pore water conditions, there are wide ranges in resistivity for any particular soil or rock type, and resistivity values cannot be directly interpreted in terms of soil type or lithology. Commonly, however, zones of distinctive resistivity can be associated with specific soil or rock units on the basis of local field or drill hole information, and resistivity surveys can be used profitably to extend field investigations into areas with very limited or nonexistent data. Also, resistivity surveys may be used as a reconnaissance method, to detect anomalies that can be further investigated by complementary geophysical methods and/or drill holes.

The electrical resistivity method has some inherent limitations that affect the resolution and accuracy that may be expected from it. Like all methods using measurements of a potential field, the value of a measurement obtained at any location represents a weighted average of the effects produced over a large volume of material, with the nearby portions contributing most heavily. This tends to produce smooth curves, which do not lend themselves to high resolution for interpretations. Another feature common to all potential field geophysical methods is that a particular distribution of potential at the ground surface does not generally have a unique interpretation. Although these limitations should be recognized, the non-uniqueness or ambiguity of the resistivity method is scarcely less than with the other geophysical methods. For these reasons, it is always advisable to use several complementary geophysical methods in an integrated exploration program rather than relying on a single exploration method.

4.1 Theory

Data from resistivity surveys are customarily presented and interpreted in the form of values of apparent resistivity ρ_a . Apparent resistivity is defined as the resistivity of an electrically homogeneous and isotropic half-space that would yield the measured relationship between the applied current and the potential difference for a particular arrangement and spacing of electrodes. An equation giving the apparent resistivity in terms of applied current, distribution of potential, and

arrangement of electrodes can be arrived at through an examination of the potential distribution due to a single current electrode. The effect of an electrode pair (or any other combination) can be found by superposition. Consider a single point electrode, located on the boundary of a semi-infinite, electrically homogeneous medium, which represents a fictitious homogeneous earth. If the electrode carries a current I , measured in amperes (a), the potential at any point in the medium or on the boundary is given by:

$$U = \rho \frac{I}{2\pi r}, \quad (1)$$

where

U = potential, in V ,

ρ = resistivity of the medium,

r = distance from the electrode.

The mathematical demonstration for the derivation of the equation may be found in textbooks on geophysics, such as Keller and Frischknecht (1966).

For an electrode pair with current I at electrode A, and $-I$ at electrode B (figure 1), the potential at a point is given by the algebraic sum of the individual contributions:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi r_A} - \frac{\rho I}{2\pi r_B} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right] \quad (2)$$

where

r_A and r_B = distances from the point to electrodes A and B

Figure 1 illustrates the electric field around the two electrodes in terms of equipotentials and current lines. The equipotentials represent imaginary shells, or bowls, surrounding the current electrodes, and on any one of which the electrical potential is everywhere equal. The current lines represent a sampling of the infinitely many paths followed by the current, paths that are defined by the condition that they must be everywhere normal to the equipotential surfaces.

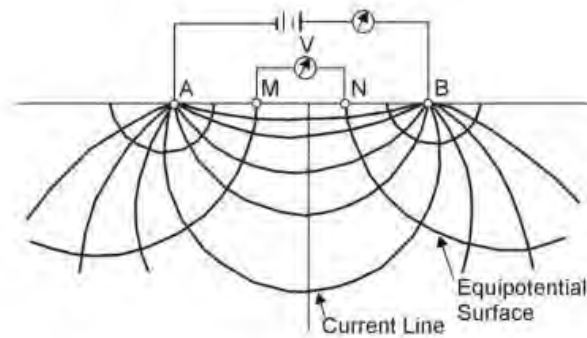


Figure 1 Equi-potentials and current lines for a pair of current electrodes A and B on a homogeneous half-space.

In addition to current electrodes A and B, figure 1 shows a pair of electrodes M and N, which carry no current, but between which the potential difference V may be measured. Following the previous equation, the potential difference V may be written

$$V = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} \right] \quad (3)$$

where

U_M and U_N = potentials at M and N ,

AM = distance between electrodes A and M , etc.

These distances are always the actual distances between the respective electrodes, whether or not they lie on a line. The quantity inside the brackets is a function only of the various electrode spacings.

The quantity is denoted $1/K$, which allows rewriting the equation as:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{K} \quad (4)$$

where

K = array geometric factor.

Equation (4) can be solved for ρ to obtain:

$$\rho = 2\pi K \frac{V}{I} \quad (5)$$

The resistivity of the medium can be found from measured values of V, I , and K , the geometric factor. K is a function only of the geometry of the electrode arrangement.

4.2 Apparent Resistivity

Wherever these measurements are made over a real heterogeneous earth, as distinguished from the fictitious homogeneous half-space, the symbol ρ is replaced by ρ_a for apparent resistivity. The resistivity surveying problem is, reduced to its essence, the use of apparent resistivity values from field observations at various locations and with various electrode configurations to estimate the true resistivities of the several earth materials present at a site and to locate their boundaries spatially below the surface of the site.

An electrode array with constant spacing is used to investigate lateral changes in apparent resistivity reflecting lateral geologic variability or localized anomalous features. To investigate changes in resistivity with depth, the size of the electrode array is varied. The apparent resistivity is affected by material at increasingly greater depths (hence larger volume) as the electrode spacing is increased. Because of this effect, a plot of apparent resistivity against electrode spacing can be used to indicate vertical variations in resistivity.

The types of electrode arrays that are most commonly used (Schlumberger, Wenner, and dipole-dipole). There are other electrode configurations that are used experimentally or for non-geotechnical problems or are not in wide popularity today. Some of these include the Lee, half-Schlumberger, polar dipole, bipole-dipole, and gradient arrays. In any case, the geometric factor for any four-electrode system can be found from equation 3 and can be developed for more complicated systems by using the rule illustrated by equation 2. It can also be seen from equation 58 that the current and potential electrodes can be interchanged without affecting the results; this property is called reciprocity.

4.3 Instruments and Measurements

The theory and field methods used for resistivity surveys are based on the use of direct current, because it allows greater depth of investigation than alternating current and because it avoids the complexities caused by effects of ground inductance and capacitance and resulting frequency dependence of resistivity. However, in practice, actual direct current is infrequently used for two reasons: (1) direct current electrodes produce polarized ionization fields in the electrolytes around them, and these fields produce additional electromotive forces that cause the current and potentials in the ground to be different from those in the electrodes; and (2) natural Earth currents (telluric currents) and spontaneous potentials, which are essentially unidirectional or slowly time-varying, induce potentials in addition to those caused by the applied current. The effects of these phenomena, as well as any others that produce unidirectional components of current or potential gradients, are

reduced by the use of alternating current, because the polarized ionization fields do not have sufficient time to develop in a half-cycle, and the alternating component of the response can be measured independently of any superimposed direct currents. The frequencies used are very low, typically below 20 Hz, so that the measured resistivity is essentially the same as the direct current resistivity.

In concept, a direct current (I), or an alternating current of low frequency, is applied to the current electrodes, and the current is measured with an ammeter. Independently, a potential difference ΔV is measured across the potential electrodes, and, ideally, there should be no current flowing between the potential electrodes. This is accomplished either with a null-balancing galvanometer (old technology) or very high input impedance operational amplifiers. A few resistivity instruments have separate "sending" and "receiving" units for current and potential; but in usual practice, the potential measuring circuit is derived from the same source as the potential across the current electrodes, so that variations in the supply voltage affect both equally and do not affect the balance point.

Power is usually supplied by dry cell batteries in the smaller instruments and motor generators in the larger instruments. From 90 V up to several hundred volts may be used across the current electrodes in surveys for engineering purposes. In the battery-powered units, the current usually is small and is applied only for very short times while the potential is being measured, so battery consumption is low. Care should be taken to NEVER energize the electrodes while they are being handled, because with applied potentials of hundreds of volts, DANGEROUS AND POTENTIALLY LETHAL shocks could be caused.

Current electrodes used with alternating current (or commutated direct current) instruments commonly are stakes of bronze, copper, steel with bronze jackets, or, less desirably, steel, about 50 cm in length. They must be driven into the ground far enough to make good electrical contact. If there is difficulty because of high contact resistance between electrodes and soil, it can sometimes be alleviated by pouring salt water around the electrodes. Many resistivity instruments include an ammeter to verify that the current between the current electrodes is at an acceptable level, a desirable feature. Other instruments simply output the required potential difference to drive a selected current into the current electrodes. Typical currents in instruments used for engineering applications range from 2 mA to 500 mA. If the current is too small, the sensitivity of measurement is degraded. The problem may be corrected by improving the electrical contacts at the electrodes. However, if the problem is due to a combination of high earth resistivity and large electrode spacing,

the remedy is to increase the voltage across the current electrodes. Where the ground is too hard or rocky to drive stakes, a common alternative is sheets of aluminum foil buried in shallow depressions or within small mounds of earth and wetted.

One advantage of the four-electrode method is that measurements are not sensitive to contact resistance at the potential electrodes so long as it is low enough that a measurement can be made, because observations are made with the system adjusted so that there is no current in the potential electrodes. With zero current, the actual value of contact resistance is immaterial, since it does not affect the potential. On the current electrodes also, the actual value of contact resistance does not affect the measurement, so long as it is small enough that a satisfactory current is obtained, and so long as there is no gross difference between the two electrodes. Contact resistance affects the relationship between the current and the potentials on the electrodes, but because only the measured value of current is used, the potentials on these electrodes do not figure in the theory or interpretation.

When direct current is used, special provisions must be made to eliminate the effects of electrode polarization and telluric currents. A non-polarizing electrode is available in the form of a porous, unglazed ceramic pot, which contains a central metallic electrode, usually copper, and is filled with a liquid electrolyte that is a saturated solution of a salt of the same metal (copper sulphate is used with copper). The central electrode is connected to the instrument, and electrical contact with the ground is made through the electrolyte in the pores of the ceramic pot. This type of electrode may be advantageous for use on rock surfaces where driving rod-type electrodes is difficult. Good contact of the pot with the ground can be aided by clearing away grass and leaves beneath it, embedding it slightly in the soil, and if the ground is dry, pouring a small amount of water on the surface before placing the pot. The pots must be filled with electrolyte several hours before they are used to allow the electrolyte to penetrate the fine pores of the ceramic. The porous pot electrodes should be checked every several hours during the field day to verify the electrolyte level and the presence of the solid salt to maintain the saturated solution.

Telluric currents are naturally occurring electric fields that are widespread, some being of global scale. They are usually of small magnitude, but may be very large during solar flares or if supplemented by currents of artificial origin. Spontaneous potentials in the earth may be generated by galvanic phenomena around electrochemically active materials, such as pipes, conduits, buried scrap materials, cinders, and ore deposits. They may also occur as streaming potentials generated by groundwater movement. (Electric fields associated with groundwater movement will have the

greatest amplitude where groundwater flow rates are high, such as through subsurface open-channel flow. Groundwater movement in karst areas can exhibit rapid flow through dissolved channels within the rock. Springs and subsurface flow may be the cause of telluric sources, which may obscure resistivity measurements.) Telluric currents and spontaneous potential effects can be compensated by applying a bias potential to balance the potential electrodes before energizing the current electrodes. Because telluric currents generally vary with time, frequent adjustments to the bias potential may be necessary in the course of making an observation. If the instrument lacks a provision for applying a bias potential, a less satisfactory alternative is to use a polarity-reversing switch to make readings with alternately reversed current directions in the current electrodes. The average values of V and I for the forward and reverse current directions are then used to compute the apparent resistivity.

Layout of electrodes should be done with non-conducting measuring tapes, since tapes of conducting materials, if left on the ground during measurement, can influence apparent resistivity values. Resistivity measurements can also be affected by metallic fences, rails, pipes, or other conductors, which may induce spontaneous potentials and provide short-circuit paths for the current. The effects of such linear conductors as these can be minimized, but not eliminated, by laying out the electrode array on a line perpendicular to the conductor; but in some locations, such as some urban areas, there may be so many conductive bodies in the vicinity that this cannot be done. Also, electrical noise from power lines, cables, or other sources may interfere with measurements. Because of the nearly ubiquitous noise from 60-Hz power sources in the United States, the use of 60 Hz or its harmonics in resistivity instruments is not advisable. In some cases, the quality of data affected by electrical noise can be improved by averaging values obtained from a number of observations; sometimes electrical noise comes from temporary sources, so better measurements can be obtained by waiting until conditions improve. Occasionally, ambient electrical noise and other disturbing factors at a site may make resistivity surveying infeasible. Modern resistivity instruments have capability for data averaging or stacking; this allows resistivity surveys to proceed in spite of most noisy site conditions and to improve signal-to-noise ratio for weak signals.

4.4 Data Acquisition

Resistivity surveys are made to satisfy the needs of two distinctly different kinds of interpretation problems: (1) the variation of resistivity with depth, reflecting more or less horizontal stratification of earth materials; and (2) lateral variations in resistivity that may indicate soil lenses, isolated ore bodies, faults, or cavities. For the first kind of problem, measurements of apparent resistivity are made at a single location (or around a single center point) with systematically varying

electrode spacing. This procedure is sometimes called vertical electrical sounding (VES), or vertical profiling. Surveys of lateral variations may be made at spot or grid locations or along definite lines of traverse, a procedure sometimes called horizontal profiling.



Figure 2 DC Resistivity data acquisition system deployed for site characterization

4.5 Wenner-Schlumberger array

Wenner-Schlumberger array is generally adopted in areas with limited open space for a long survey line. The conventional Wenner array has a disadvantage in that there is a large reduction in horizontal coverage when the electrode spacing is increased in order to achieve a deeper depth of investigation. For example, in order to increase the depth of investigation by two times, the electrode spacing ' a ' has to be increased to $2a$ (see figures 3 and 4 below). In this case, the total length of the array is increased from $3a$ to $6a$. At the same time, the width of the pseudo-section decreases by $3a$ with each level of measurement (See figure far below). In comparison, the width of the pseudo-section decreases by $2a$ for the Wenner-Schlumberger array.

The apparent resistivity value for the Wenner-Schlumberger array is given by $\pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot a \cdot R$, where R is the measured resistivity, a is the spacing between the $P1$ and $P2$ electrodes and n is the ratio of the distances between the $C1-P1$ and the $P1-P2$ electrodes. This array effectively becomes the Schlumberger array when the n factor is greater than 2. Thus it is actually a combination of the Wenner and Schlumberger arrays adapted for use for an arrangement with a line of electrodes with a constant spacing (as normally used in 2D electrical imaging). Besides better horizontal coverage, the maximum depth of penetration of this array is about 15% larger than the Wenner array.

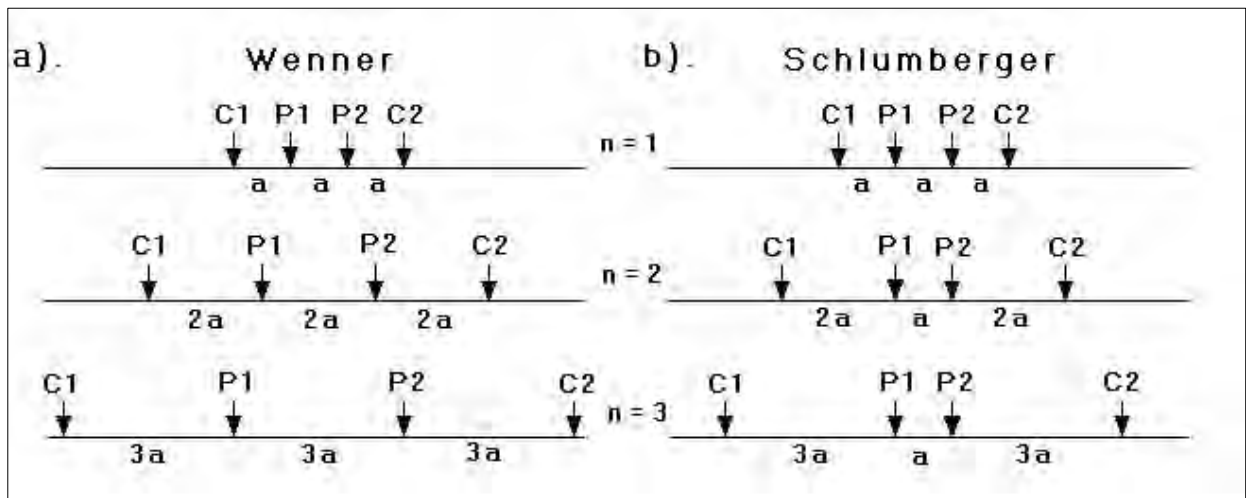


Figure 3 Steps used by (a) Wenner and the (b) Wenner-Schlumberger arrays to increase the depth of investigation.

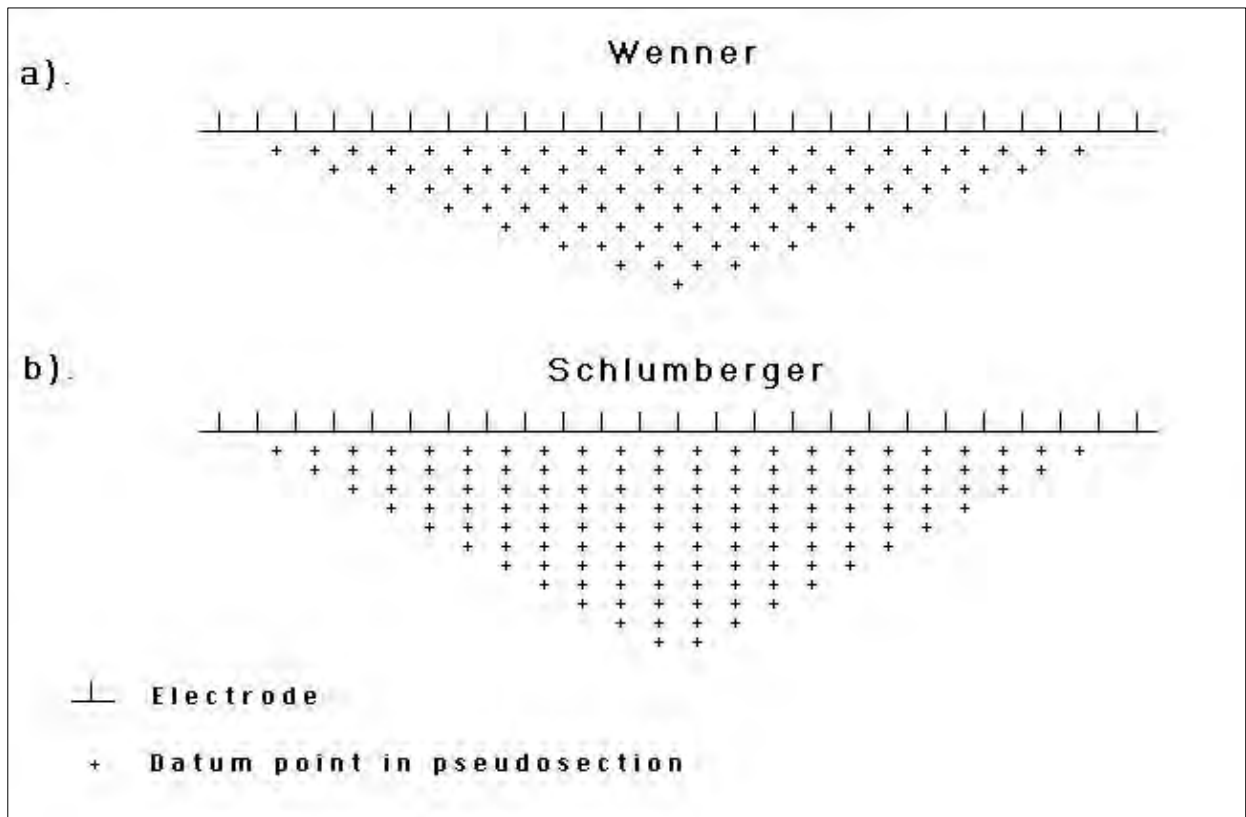


Figure 4 Arrangement of datum points in the pseudo-section for (a) Wenner and (b) Wenner-Schlumberger arrays.

In practice, since the potential between the $P1$ and $P2$ electrodes decreases when the electrode spacing factor n is increased, the maximum value of n used in actual field surveys is about 8. To increase the depth of investigation, the spacing between the $P1$ - $P2$ electrodes is increased to $2a$ and the measurements are repeated for n equals to 3, 4, 5 and 6. Next, the $P1$ - $P2$ spacing is increased to $3a$, and the same sequence of measurements is made. The field situation however differs from one area to other.

4.6 Description of results

Having discussed various methods in practice, we have chosen Wenner – Schlumberger array in the present investigations for the advantages mentioned above. The layout of the traverses surveys for Bethora area is shown in Figure 5. The red colored lines are meant for resistivity surveys, the start and end of the traverses is shown in the figure. The available nalahs are also marked.

LAYOUT OF GEOPHYSICAL TRAVERSES AT BETHORA AREA, GOA

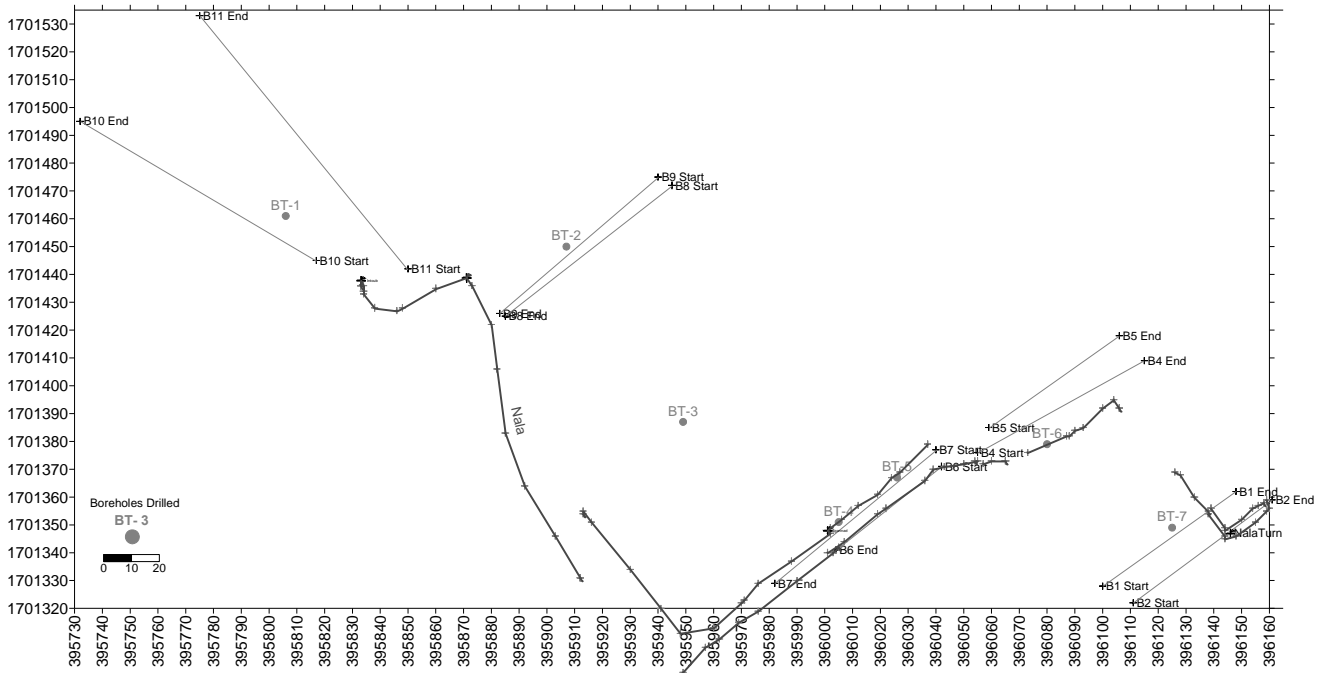
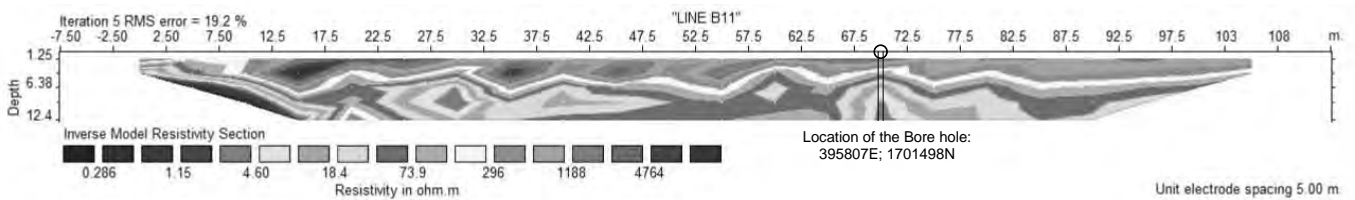


Figure 5: Layout of geophysical Traverses in Bethora area

The data obtained from the field surveys, apparent resistivities computed using the formula $\pi * n * (n+1) * a * R$ for the Wenner-Schlumberger array, where **R** is the measured resistivity, **a** is the spacing between the *P1* and *P2* electrodes and **n** is the ratio of the distances between the *C1-P1* and the *P1-P2* electrodes are listed for the traverse B11. The current and resistance are the parameters obtained at different stations along the traverse for different values of $n = 1, 2, 3, 4$ and 5. Apparent resistivity (ρ_a) is calculated for different values of n and listed in the following table. The data are prepared in a special format as input for the inversion program *RES2dInv*, to yield geo-electrical section of the input data.



The geoelectrical section along the line B11 (part of Figure 9) depicts relatively high resistivity zone indicating lateritic cover all along. Below 6m the resistivity values are of the low order, but around 70m there appears to be low resistivity zone of the order 2Ωm and this site seems to have good water zone. Also the water from west to east must be joining this zone. That is why one borehole is suggested at this site. The coordinates are read from the GPS coordinates (red color in the Table) and marked on the section.

Resistivity data recorded in the field and apparent resistivity computations as INPUT for **2dRESInv**

n = 1				n = 2				n = 3			
Dis	Current	Resistance	ρ_a	Dis	Current	Resistance	ρ_a	Dis	Current	Resistance	ρ_a
0	39.32	4.92258	154.65	0	-	-	-	0	-	-	-
5	21.22	4.04336	127.03	5	43.41	0.79957	75.36	5	-	-	-
10	40.45	11.1912	351.58	10	30.05	0.8831	83.23	10	140.31	0.01674	3.16
15	21.83	11.8014	370.75	15	51.73	1.11146	104.75	15	41.74	0.11869	22.37
20	25.71	17.6154	553.4	20	23.82	1.30553	123.04	20	28.66	0.23683	44.64
25	23.89	13.7049	430.55	25	28.18	2.0208	190.46	25	15.6	0.31823	59.98
30	20.89	15.356	482.42	30	31.83	1.92977	181.88	30	24.97	0.28443	53.61
35	26.64	15.8517	498	35	23.36	2.18082	205.54	35	32.65	0.42828	80.73
40	34.07	17.8582	561.03	40	27.71	2.90172	273.48	40	13.16	0.5492	103.52
45	16.34	17.2558	542.11	45	14.33	2.49297	234.96	45	13.68	0.42907	80.88
50	14.38	19.5329	613.64	50	13.96	2.78122	262.12	50	12.53	0.42498	80.11
55	17.56	11.05	347.15	55	11.64	2.5141	236.95	55	22.34	0.43842	82.64
60	14.69	16.3159	512.58	60	21.59	1.9368	182.54	60	31.26	0.52014	98.04
65	10.64	10.5736	332.18	65	32.59	1.78944	168.65	65	11.76	0.31473	59.33
70	27.88	17.0027	534.16	70	8.57	1.70703	160.88	70	26.18	0.39565	74.58
75	11.32	14.6159	459.17	75	26.24	1.0809	101.87	75	14.64	0.21032	39.64
80	24.27	15.1004	474.39	80	21.63	2.17099	204.61	80	21.52	0.32518	61.29
85	32.94	16.1928	508.71	85	31.21	1.67631	157.99	85	13.55	0.29495	55.6
90	28.59	14.9157	468.59	90	50.76	1.72204	162.3	90	31.68	0.35904	67.68
95	55.17	21.8711	687.1	95	16.62	1.87165	176.4	95	37.82	0.34614	65.25
100	46.97	11.5583	363.11	100	46.03	1.55828	146.86	100	-	-	-
105	67.88	12.9823	407.85	105	-	-	-	105	-	-	-
n = 4				n = 5							
Dis	Current	Resistance	ρ_a	Dis	Current	Resistance	ρ_a	Easting	Northing		
0	-	-	-	0	-	-	-	395848	1701449		
5	-	-	-	5	-	-	-	395845	1701452		
10	-	-	-	10	-	-	-	395844	1701456		
15	53.29	0.16504	51.85	15	-	-	-	395841	1701459		
20	36.05	0.06212	19.52	20	37.62	0.08717	41.08	395838	1701463		
25	31.88	0.0887	27.87	25	66.01	0.05513	25.98	395834	1701466		
30	57.52	0.08799	27.64	30	84.81	0.04001	18.85	395831	1701470		
35	26.73	0.17844	56.06	35	29.93	0.07999	37.69	395829	1701472		
40	23.97	0.08233	25.86	40	23.4	0.01714	8.08	395826	1701476		
45	27.93	0.0912	28.65	45	63.9	0.06055	28.53	395823	1701478		
50	34.09	0.11775	36.99	50	32.66	0.05798	27.32	395821	1701482		
55	23.77	0.1576	49.51	55	32.34	0.07909	37.27	395818	1701485		
60	39.24	0.12876	40.45	60	36.23	0.07421	34.97	395814	1701489		
65	45.62	0.1706	53.6	65	21.74	0.11027	51.96	395810	1701493		
70	27.17	0.1589	49.92	70	61.03	0.05058	23.84	395807	1701498		
75	29.54	0.07346	23.08	75	44.92	0.0503	23.7	395803	1701501		
80	23.89	0.1029	32.33	80	16.97	0.04429	20.87	395800	1701505		
85	18.44	0.12176	38.25	85	50.64	0.09369	44.15	395796	1701509		
90	46.34	0.10363	32.56	90	-	-	-	395793	1701512		
95	-	-	-	95	-	-	-	395788	1701516		
100	-	-	-	100	-	-	-	395785	1701519		
105	-	-	-	105	-	-	-	395783	1701521		

This exercise is done for all eleven sections of Bethora area and results are summarized in figures 6, 7, 8, and 9. The raw and processed data are given in Res_data.xls

Similar approach was adopted in Concolim area and the lay out for geophysical traverses is presented in Figure 10 below.

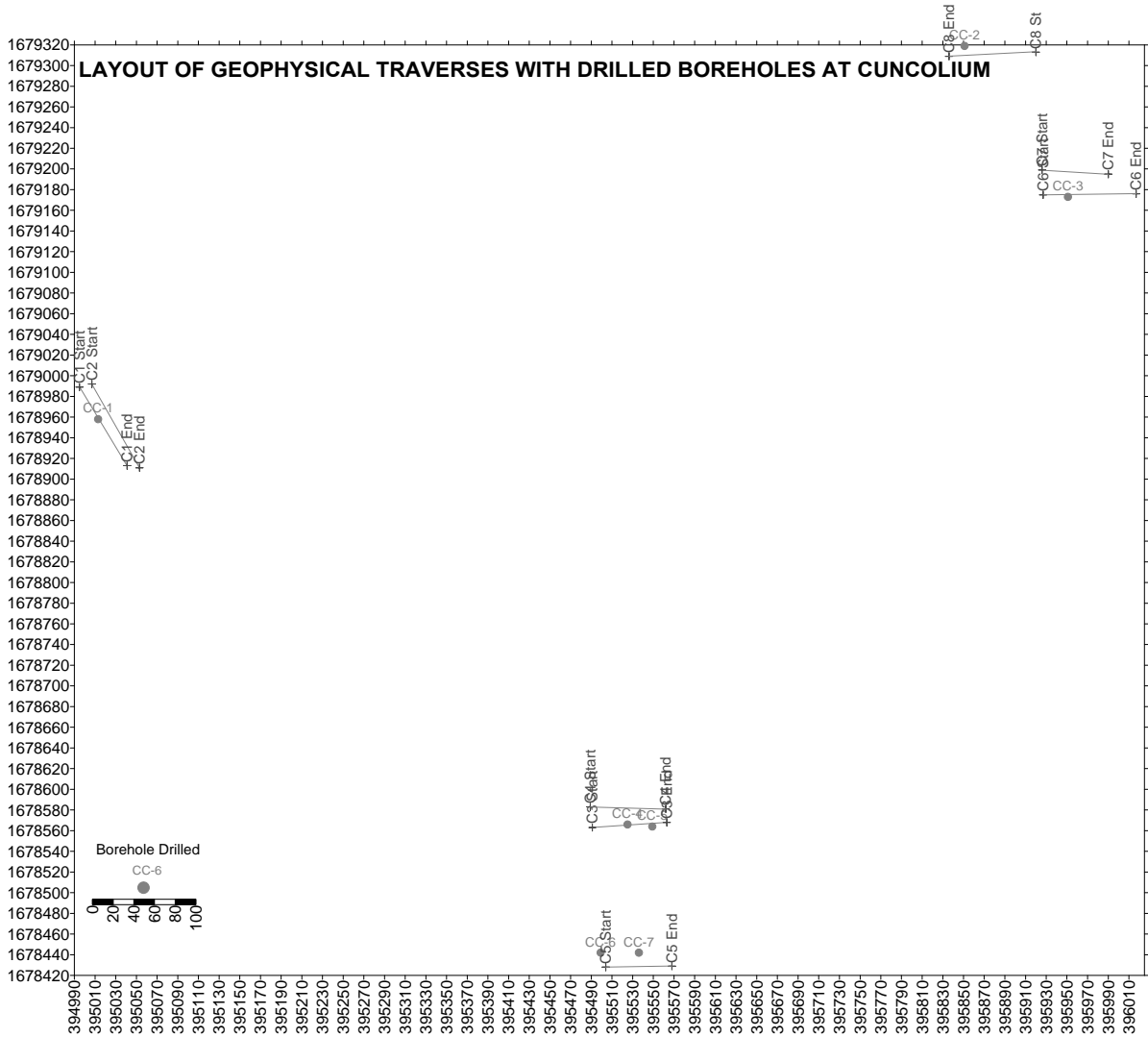


Figure 10 Layout of geophysical traverses in Concolim area

The field data is carefully edited, the apparent resistivities are computed as done earlier and the geoelectrical sections are presented in figures 11, 12 and 13. The sections and the report with the recommended boreholes is submitted to the concerned for finalization of the boreholes for next course of action.

Recommended boreholes

Bathora			Concolim		
Line Id	Easting	Northing	Line Id	Easting	Northing
Line B1	396127	1701347	Line C1	395023	1678963
Line B2	396128	1701336	Line C2	395020	1678946
Line B3	396081	1701379	Line C3	395551	1678565
Line B4	396083	1701383	Line C4	395525	1678582
Line B5	-	-	Line C5	395540	1678429
Line B6	396008	1701344	Line C6	395955	1679175
Line B7	396006	1701348	Line C7	395950	1679196
Line B8	395903	1701439	Line C8	395850	1679310
Line B9	395909	1701447	-	-	-
Line B10	395779	1701472	-	-	-
Line B11	395807	1701498	-	-	-

The team of experts have visited the recommended sites, and depending on the feasibility for drilling, approachability, the ground conditions and other constraints, finally the number of boreholes to be drilled was decided (please note that the finally approved and drilled boreholes are marked in the layout diagrams of the concerned areas).

5 BOREWELLS DRILLED IN BETHORA AND CUNCOLIM INDUSTRIAL ESTATES

Fourteen bore wells were drilled and installed for groundwater monitoring & groundwater remediation in Bethora IDC (seven) and Cuncolim IDC (seven). The locations of these boreholes is tabulated as follows:

Drilled boreholes

Bethora				Cuncolim			
BH Id	Easting	Northing	Line Ids	BH Id	Easting	Northing	Line Ids
BT-1	395806	1701461	Line B10	CC-1	395013	1678958	Line C1
BT-2	395907	1701450	Line B9	CC-2	395851	1679319	Line C8
BT-3	395949	1701387		CC-3	395951	1679173	Line C6
BT-4	396005	1701351	Line B7	CC-4	395525	1678566	Line C3
BT-5	396026	1701367	Line B7	CC-5	395549	1678564	Line C3
BT-6	396080	1701379	Line B3	CC-6	395499	1678442	Line C5
BT-7	396125	1701349	Line B1	CC-7	395536	1678442	Line C5

6 SPECIFICATIONS FOR DRILLING

6.1 Drilling Procedure

After the identification of a suitable location by Geophysical techniques to meet the specified purpose of the well, the drilling rig is set up. The drilling process by pneumatic truck mounted rig itself

may last from a few hours to a few days (for a shallow, small-diameter well) depending upon the location and the geology of the area identified.

6.2 Pneumatic DTH drilling rigs for 200 mm diameter borewell

The type of drilling rig that was be used at site is as under:

Tripod pneumatic rig with compressor of 1250cfm required for DTH drilling for 200mm diameter bore wells, Make Atlas Copco/ KRD/ Ingersol Rand.

Once the well bore is drilled, the driller installs well blank casing (of 8”) to protect collapsing of overburden. Then the driller develops the well (see Well Development), implements an aquifer test by the V notch technique, completes the seal of the well head, (and under normal circumstances installs a pump and power source, which however shall not be in the current scenario).



6.3 Blank/ Slotted pipes/ Screens



The pipe details can be checked out in the link below.

http://supreme.co.in/screen_slotted_pipes.php

Technical specs of the screen:

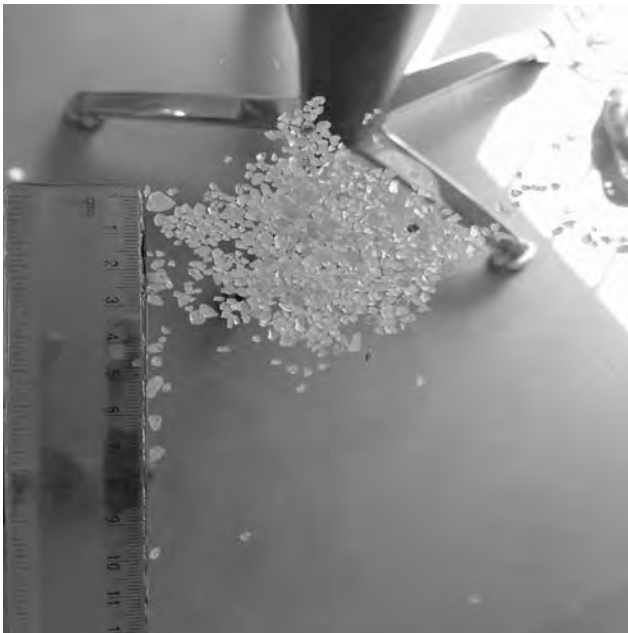
The purpose of the screen is to keep sand and gravel from the gravel pack (described below) out of the well while providing ample water flow to enter the casing. The screen is also designed to allow the well to be properly developed (see Well Development).

The purposes of the blank well casing between and above the well screens are to prevent fine and very fine formation particles from entering the well, to provide an open pathway from the aquifer to the surface, to provide a proper

housing for the pump, and to protect the pumped ground water from interaction with shallower ground water that may be of lower quality.

At the surface of the well, a surface casing is commonly installed to facilitate the installation of the well seal. The surface casing and well seal protect the well against contamination of the gravel pack and keep shallow materials from caving into the well. Surface casing and well seals are particularly important in hard rock wells to protect the otherwise open, uncased borehole serving as a well.

6.4 Well Development



6.4.1 Gravel

We have used white color Rajasthani sand from North India for the purposes of gravel filling outside the casing pipe. The sand is normally white to pink in color of 3mm-4mm in grain size.

The annular space between the well casing (blind or slotted) and borehole wall is filled with gravel or coarse sand (called the *gravel pack* or *filter pack*). The gravel pack prevents sand and fine sand particles from moving from the aquifer formation into the well. The gravel pack does not exclude fine silt

and clay particles; where those occur in a formation it is best to use blank casing sections.

After the well screen and well casing is inserted, the driller fills the annular around the casing with the gravel. Once the gravel pack has been installed, the well is *developed/flushed* to clean the borehole and casing, to properly settle the gravel pack around the well screen. A typical method for well development is to surge or jet water or air in and out of the well screen openings. This procedure may take a few hours or perhaps longer, depending on the size and depth of the well. A properly developed gravel pack keeps fine sediments out of the well and provides a clean and unrestricted flow path for ground water.

6.4.2 Well Head Protection

The construction of the final well seal is intended to provide protection from leakage and to keep runoff from entering the well head. Details of the Chambers for every well have been sketched out in the respective AutoCad drawings as seen in the attachment (Annexure I & II).

6.4.3 Maintenance of Drilling Log

During drilling, the drillers / site supervisor have maintained a detailed log of the drill fine cuttings obtained from the advancing borehole.

The inner and outer dimensions of the chambers constructed for each borehole, are given in the following table and presented diagrammatically in the respective Annexure I & II.

Dimensions (in mm) of the Chambers at Bethora & Cuncolim Sites					
Bore ID	Length	Width	Height	Chamber Inside height	Casing height from the Chamber Floor
BT 1	635	635	780	330	130
BT 2	760	760	300	300	070
BT 3	660	660	380	280	080
BT 4	760	760	Ground Level	440	190
BT 5	760	760	Ground Level	360	180
BT 6	660	660	660	380	120
BT 7	760	760	Ground Level	450	250
CC 1	750	750	720	330	120
CC 2	660	635	700	220	100
CC 3	740	800	600	240	150
CC 4	660	660	920	360	100
CC 5	660	660	600	360	140
CC 6	660	660	450	240	140
CC 7	660	660	690	230	100

6.4.4 Bore hole logs and Borewell Details

In the attached BoreLogs.xls the detailed information as follows, of each borewell is given:

1. **Client**
2. **Site Address**
3. **Borewell No**
4. **Location of borewell**
5. **Date of Start of Drilling**
6. **Date of Completion of Drilling**

7. **Time of Start**
8. **Time of completion**
9. **Casing**
10. **total depth (m)**

6.4.5 General Geology and observations

The Geology of the areas in consideration can be explained broadly as under. The main rock type in the drill site area is laterite with a cover of lateritic soil which is finely decomposed material with fine fragments of original basaltic rock. The fragments consist mainly of Iron rich segregations which have been consolidated.

Below this formation is a good laterite bed with no other components or other fragments of original basalt up to a particular depth. This layer is basically clayey and made up of lithomarge like rock/ bole. This layer is a mixture of clay and laterite and has been completely pulverized into fine sandy/ clayey material and reacted with the surrounding water to form the bole. With depth and the occurrence of the ground water table, this material becomes finer in grain size. In many areas such as CC1, the occurrence of this and the upper lateritic layers is not present and the top soil directly enters into the sandy material which could probably be a part of the adjoining river bed.

Finally as we go deeper beyond a depth of 12-14m, the presence of laterite/ bole decreases and there is occurrence of basalt/ metamorphosed acid rock/ quartzites/ quartz veins in either sheet or dyke formations. These are the basement rocks of either volcanic or metamorphic origin.

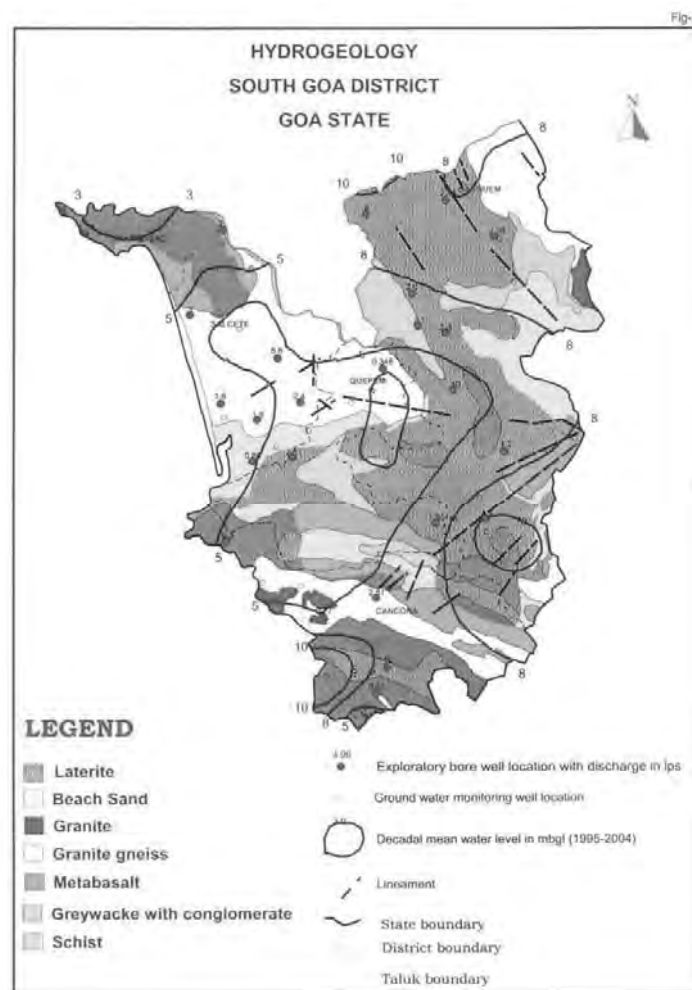
6.4.6 Structural geology

The Goa group of rocks is disposed in a general NW – SE direction. The rock types indicate three cycles of folding. The straight coastline suggests the major fault along the west coast. Associated with this fault a number of weak planes have developed. Western Ghat, which extends in NS to NNW – SSE direction represents a prominent fault zone. Even though the rock types of Goa Group have suffered considerable faulting, all the faults are not exposed on surface owing to the extensive cover of laterite. On account of various tectonic movements, the rocks have developed many fractured and joint zones up to 30 to 50 m bgl, as evident from borehole sections at Quepem. In Sacordem area in the district, NE – SW trending faults are exposed in Sacordem Iron Ore deposit along fold axis.

7 GROUND WATER SCENARIOS

7.1 Hydrogeology

Occurrence and movement of ground water depends upon the type of rock formation, structure, topography, rainfall, recharge etc. Ground water in the district occurs in rocks having primary porosity & permeability or in those having secondary porosity acquired due to weathering, leaking, tectonics, solutions etc. Ground water bearing formations in the district are laterite, alluvium, granite, granite gneiss, meta-volcanics and meta-sedimentaries. Hydrogeological map is illustrated in Figure 2 below.



7.2 Occurrence of ground water and aquifer characteristics of various formations

7.2.1 Laterites

Laterites are the important water bearing formations. Laterites are of two types, viz. insitu, occurring in plateau areas or of detrital origin generally occupying valley portions. Besides inherent

porosity, the laterites are highly jointed and fractured, which control their water bearing capacity. The topographic settings of laterites control its ground water potential. The thickness of laterites extends upto 30 m. Ground water occurs under water table condition in lateritic formation. In the plateau area and high grounds, depth of wells range from 9.40 to 26.60m bgl and depth to water level varies between 8.20 – 21.90m bgl, whereas wells located in topographic lows range in depth from 3.10 – 11.95m bgl and depth to water level varies from 1.5 – 8.40m bgl. Specific capacities varies between 1.73to 3205 m³/day/m. Promising ground water bearing areas are located near Kasapural area in Sanguem and Arelm area in Salcete taluk.

7.2.2 Alluvium

Alluvium constitutes good aquifers and is restricted to banks of rivers. Thickness of the coastal alluvium varies from 5 – 22m, and comprise of fine to coarse sand with intercalations of sandy loam, silt and clay. Depth range of 1.42 to 7.7m bgl is being tapped by dug wells. Exploratory tube wells constructed in alluvium vary in depth from 15.50 – 22m. Depth to water level in these formations varies from 1.4 to 5.85m bgl. The discharges recorded from these aquifers are between 1.88 & 3.00 lps. Specific capacities vary between 27.10 & 200.78 m³/day/m and transmissivity varies from 25.44 – 177.50 m²/day.

7.2.3 Granite and Granite Gneiss

Ground water occurs under unconfined, semi – confined and confined conditions in weathered and fractured zones of granite and granite gneiss. Depth to water level in these formations in open wells varies from 3.80m to 6.25m bgl, and specific capacities between 14.4 to 77.30m³/day/m. Exploratory bore holes drilled in granite and granitic gneiss are in the depth range of 70.70 to 124 m bgl. Discharge recorded is between 0.77 to 8.8 lps. Specific capacities in exploratory wells recorded, vary from 2.27 to 43 m³/day/m and transmissivity from 0.87 to 34.60 m²/day.

7.2.4 Metavolcanics

In unaltered state, metavolcanics are very poor in ground water. However, ground water is found to occur in zones having secondary porosity and permeability imparted due to weathering, joints and fractures. Ground water occurs both under water table and confined conditions. Water bearing zones extend up to depth of 40m to 100m.

Irrigation dug wells having diameter from 2.2m to 6.1m are found to tap the weathered zone up to 9.25m below ground level (bgl). Depth to water level in dug wells varies from 1.48m to 6.26m bgl. Specific capacity varies from 10.60m³ to 228.70m³/day/m.

Exploratory wells and deposit wells drilled by CGWB in this formation range in depth from

37.20m to 200.75m bgl and the discharges recorded range from 0.18 - 25 lps. Productive zones were encountered even up to 119m bgl. Specific capacities recorded from boreholes tested varied from 0.46m^3 to $988.47\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ and transmissivity varied from 0.25m^2 to $346.10\text{m}^2/\text{day}$. Studies have indicated that bore holes drilled in metavolcanics with thick lateritic cover in the plateau areas and close to lineaments have yields ranging from 2 to 5 lps.

7.2.5 Metasedimentaries

Metasedimentaries comprise shales, phyllites, schists, metagreywackes, argillites and quartzites. The irrigation dug wells tapping weathered zones extending from 8.5 to 19.85m bgl in these rock units with varying well diameters from 2.2 to 6.1m. Depth to water level during post and pre – monsoon periods are recorded respectively in the range between 0.48 to 12.06m bgl and 1.79 to 14.88m bgl with fluctuations between 0.86m to 8.0m. Specific capacities vary from 0.85-82.80 $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$.

8 DEPTHS TO WATER LEVELS

i) Pre-Monsoon of 2009:

The Depth to water level ranged from 1.49m to 14.90m bgl. A map showing the dept to water level in the range of <2, 2 to 5, 5 to 10 and 10 to 20m bgl is given in Figure 3 below. The map shows water level is in the range of less than 2 to 20m bgl. Water level in the range of 10 to 20 m bgl is seen as small pockets in Salcete, Quepem, Canacona & Sanguem taluks.

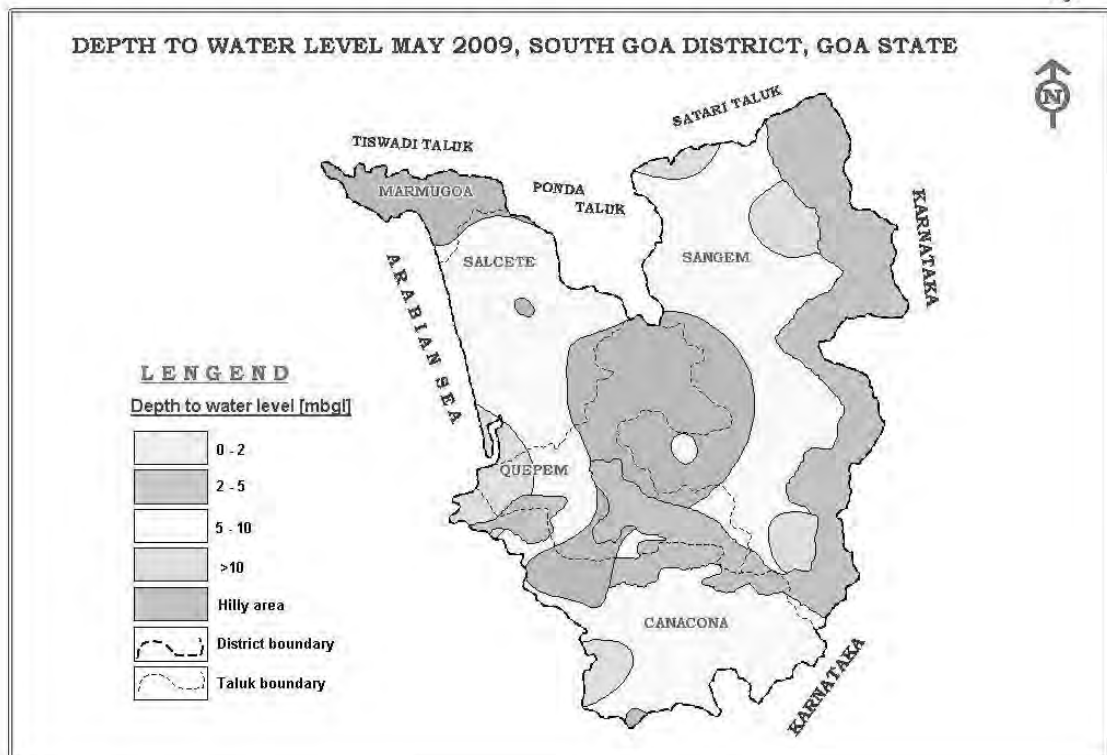
ii) Post-Monsoon of 2009:

The Depth to water level ranged from 0.74 to 14.50m bgl. A map showing the dept to water level in the range of <2, 2 to 5, 5 to 10m and 10 to 20 m bgl is given in Figure 5. The map shows water level is in the range of 2 to 20m bgl. Water level depicted in the range of <2 – 2m bgl occur in small pockets of Sanguem & Quepem taluks, 2 – 5m bgl occur in major portions of Marmugao, Salcete, Quepem, Sanguem & Canacona taluks, 5 – 10m bgl occur in Marmugao, Salcete, Sanguem & Canacona taluks. Water level in the range of 10 – 20m bgl occurs as a small pocket in Canacona taluk.

8.1 Seasonal ground water level fluctuation

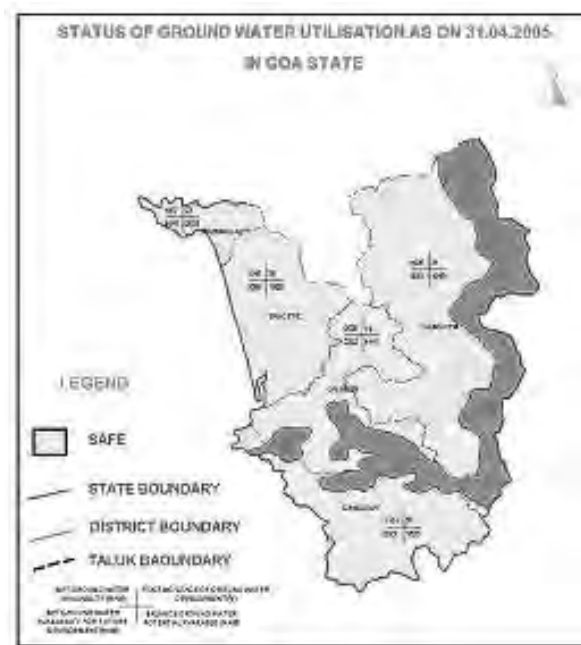
Water levels from 15 stations were compared to know the change in water level between pre-monsoon and post monsoon of 2009. While 14 stations recorded rise in water levels, 1 station recorded fall in water level.

Fig-3



8.2 Ground water quality

Ground water of the district is free from fluoride, nitrate and alkali hazards. In general the quality is good and potable. However, water table aquifers around Marmugao, especially locations close to and in the vicinity of creeks show high electrical conductivity & chloride indicating brackish to saline nature of ground water. This can be attributed to seawater ingress in inland water table aquifers. In addition to this in areas confined to the vicinity of creeks of Sal River, ground water is brackish and unsuitable for drinking. The spatial distribution of saline water is given in the following figure:



8.3 Ground water related issues & problems

Water table aquifers around Marmugao, especially locations close to and in the vicinity of creeks show high electrical conductivity & chloride indicating brackish to saline nature of ground water. This can be attributed to seawater ingress in inland water table aquifers. In addition to this in areas confined to the vicinity of creeks of Sal River, ground water is brackish and unsuitable for drinking. Salinity is more pronounced during May when fresh water flow is minimum and maximum seawater ingress takes place.

Scarcity of ground water is observed during summer months as a result of high sub – surface and surface run off due to hilly topography and highly permeable nature of phreatic aquifer system. This results in lowering of water levels or drying of wells in some areas in summer months.

9 SOUTH GOA DISTRICT AT A GLANCE

9.1 Predominant Geological Formations other than Laterite

(a) Mainly formations of Goa Group, comprising: Schist (major part), Greywacke with conglomerate, and Metabasalt.

(b) Formations of Peninsular, Gneissic Complex, comprising:

- Granite gneiss & Granite (small patches).
- Beach sand (thin strip towards western coastal part of the district).
- Vast portion of the rocks (viz. schist, greywacke with conglomerate & metabasalts) is lateritised.

9.2 Hydrogeology

Major Water Bearing formations: Laterite, Alluvium, Granite, Granite Gneiss, Meta volcanics & Meta sedimentaries.

(i) Pre - monsoon depth to water level during May 2009	1.49 to 14.90 (in m bgl)
(ii) Post – monsoon depth to water level during Nov. 2009	0.74 to 14.50 (in m bgl)
(iii) Long term water level trend in 10 years (1999 – 2009) (in m/year)	
(a) Pre – monsoon – Range from a decline of 0.83 m – rise of 3.09m.	
(b) Post – monsoon – Range from a decline of 1.40 m – rise of 3.41m.	

9.3 Ground water quality

(i)	Presence of chemical constituents more than permissible limit	Saline due to seawater ingress in inland aquifers along tidal river courses. Ground water in general is of good quality and free from fluoride, nitrate & alkali hazards.
(ii)	Type of water	Calcium – Bicarbonate Type

9.4 Major ground water problems & issues

Scarcity of ground water is during summer months as a result of high sub – surface and surface run off due to hilly topography and highly permeable nature of phreatic aquifer system. This results in lowering of water levels or drying of wells in some areas in summer months.

9.5 Seawater ingress

Water table aquifers around Marmugao, especially locations close to and in the vicinity of creeks, show high electrical conductivity & chloride indicating brackish to saline nature of ground water.

In areas confined to the vicinity of creeks of Sal River, ground water is brackish and unsuitable for drinking. Salinity is more pronounced during May when fresh water flow is minimum and maximum seawater ingress takes place.

10 GENERAL GEOLOGY AND OBSERVATIONS

The Geology of the areas in consideration can be explained broadly as under.

The main rock type in the drill site area(s) is laterite with a cover of lateritic soil which is finely decomposed material with fine fragments of original basaltic rock. The fragments consist mainly of Iron rich segregations which have been consolidated.

Below this formation is a good laterite bed with no other components or other fragments of original basalt upto a particular depth. This layer is basically clayey and made up of lithomarge like

rock/ BOLE. This layer is a mixture of clay and laterite and has been completely pulverized into fine sandy/ clayey material and reacted with the surrounding water to form the BOLE. With depth and the occurrence of the ground water table, this material becomes finer in grain size. In many areas such as CC1, the occurrence of this and the upper lateritic layers is not present and the top soil directly enters into the sandy material which could probably be a part of the adjoining river bed.

Finally as we go deeper beyond a depth of 12-14m, the presence of laterite/ BOLE decreases and there is occurrence of basalt/ metamorphosed acid rock/ quartzites/ quartz veins in either sheet or dyke formations. These are the basement rocks of either volcanic or metamorphic origin.

APPENDIX

The contents of the documents related to the investigations and the results listed in the appendix below are:

1. Bore logs of Bethora

- 1.1 BT – 1
- 1.2 BT – 2
- 1.3 BT – 3
- 1.4 BT – 4
- 1.5 BT – 5
- 1.6 BT – 6
- 1.7 BT – 7

2. Bore logs of Concolim

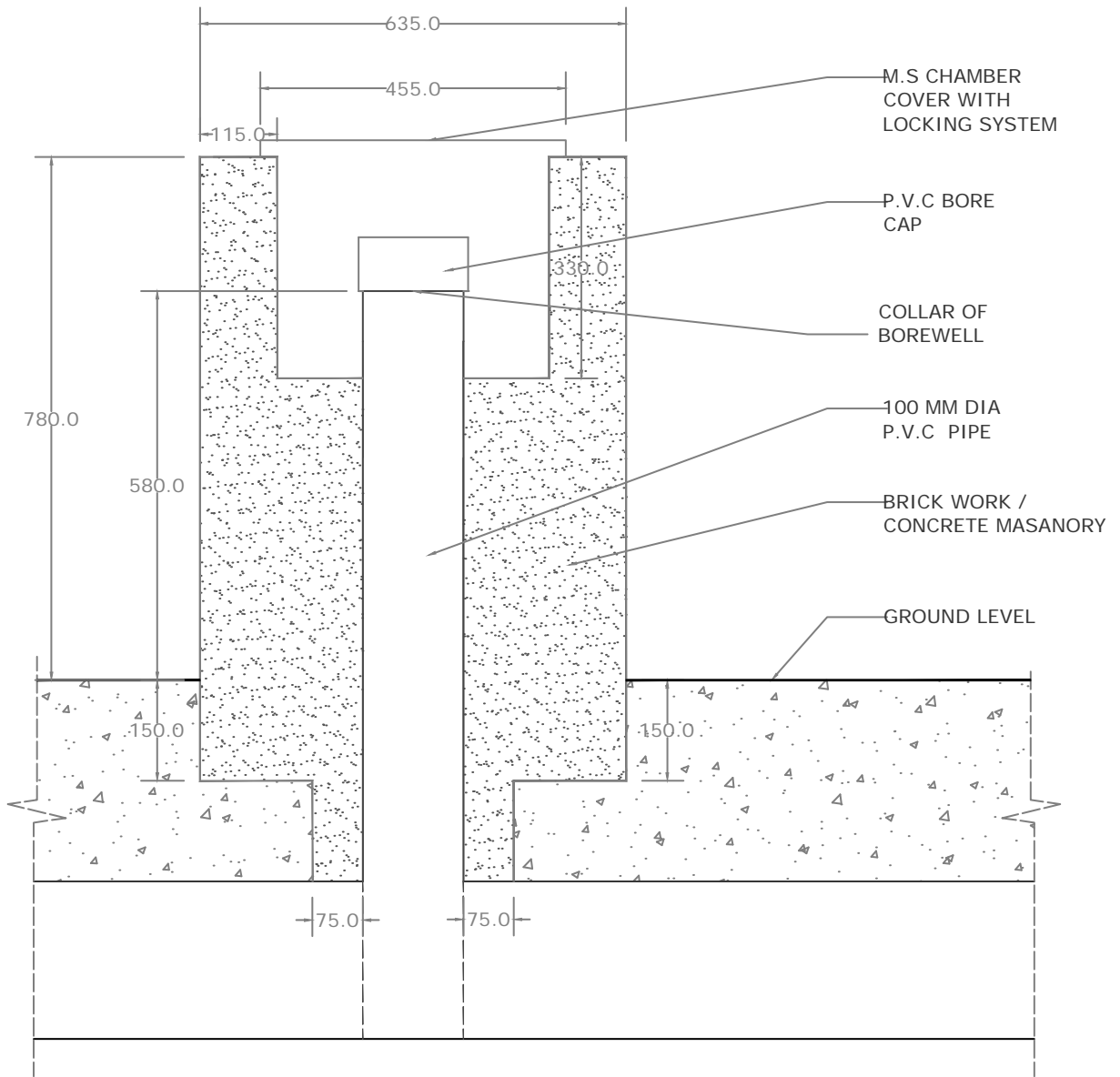
- 2.1 CC – 1
- 2.2 CC – 2
- 2.3 CC – 3
- 2.4 CC – 4
- 2.5 CC – 5
- 2.6 CC – 6
- 2.7 CC – 7

Excel Sheets Data

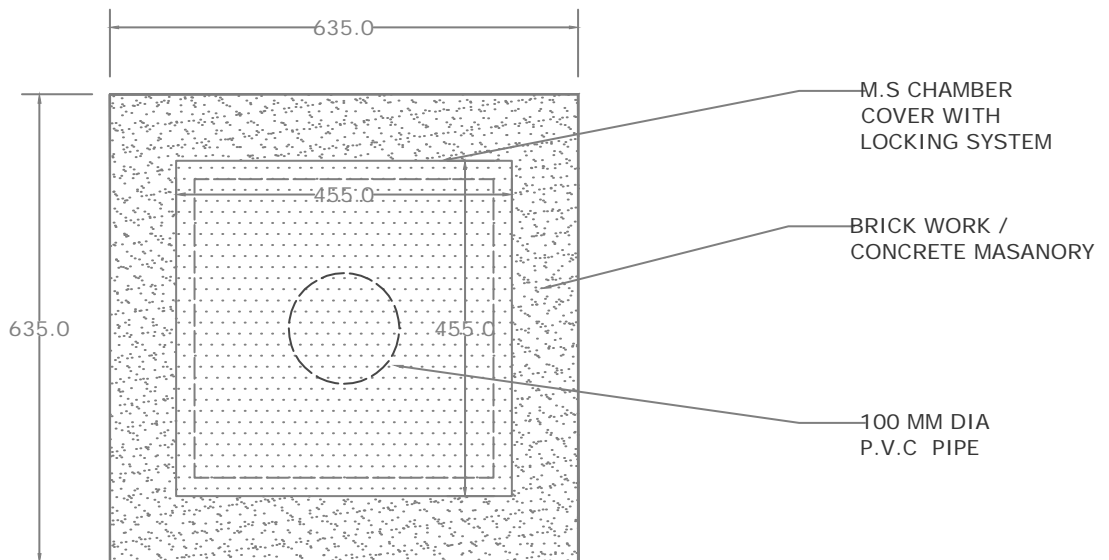
- 3. Resistivity Data of Bethora - Res_Data (Bethora) Excel Sheet
- 4. Resistivity Data of Concolim - Res_Data (Concolim) Excel Sheet

Figures

- 5. Layout of Traverses in Bethora
- 6. Geo-electrical sections along Lines B1 and B2
- 7. Apparent Resistivity contour maps and Geo electrical sections
- 8. Geo-electrical sections along Lines B6 & B7
- 9. Geo-electrical sections along Lines B8, B9, B10 & B11
- 10. Layout of Traverses with drilled borehole sites in Concolim
- 11. Geo-electrical Section along Lines C1 and C2
- 12. Geo-electrical Section along Lines C4, C3 and C5
- 13. Geo-electrical Section along Lines C6, C7 and C8

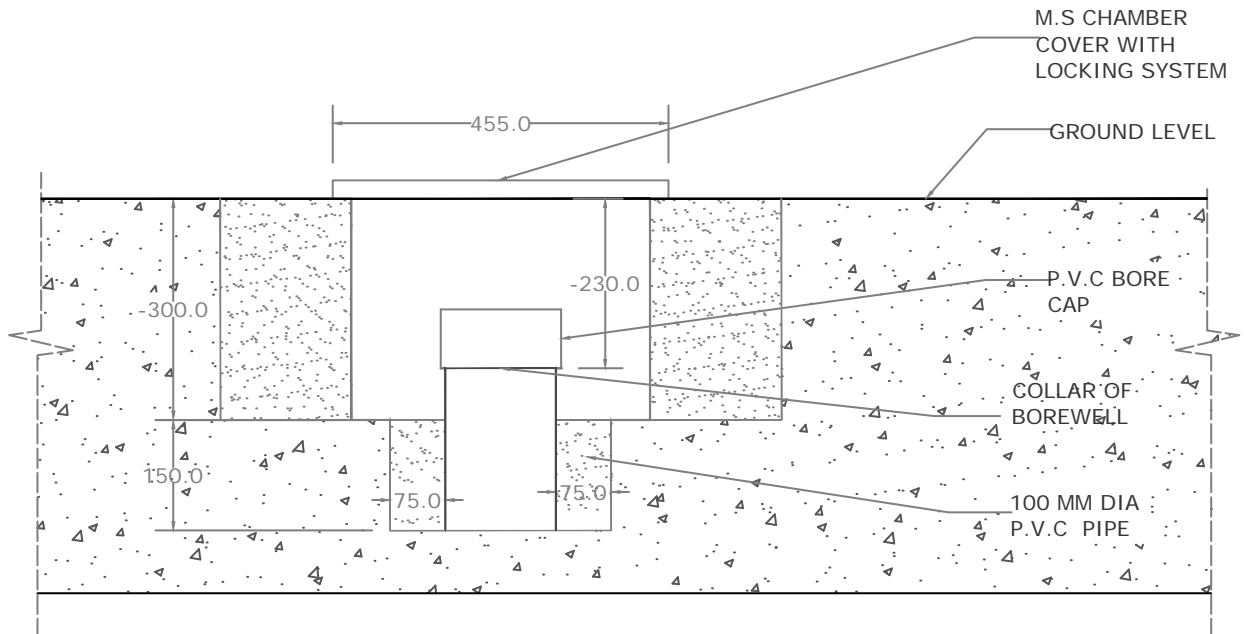


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-1

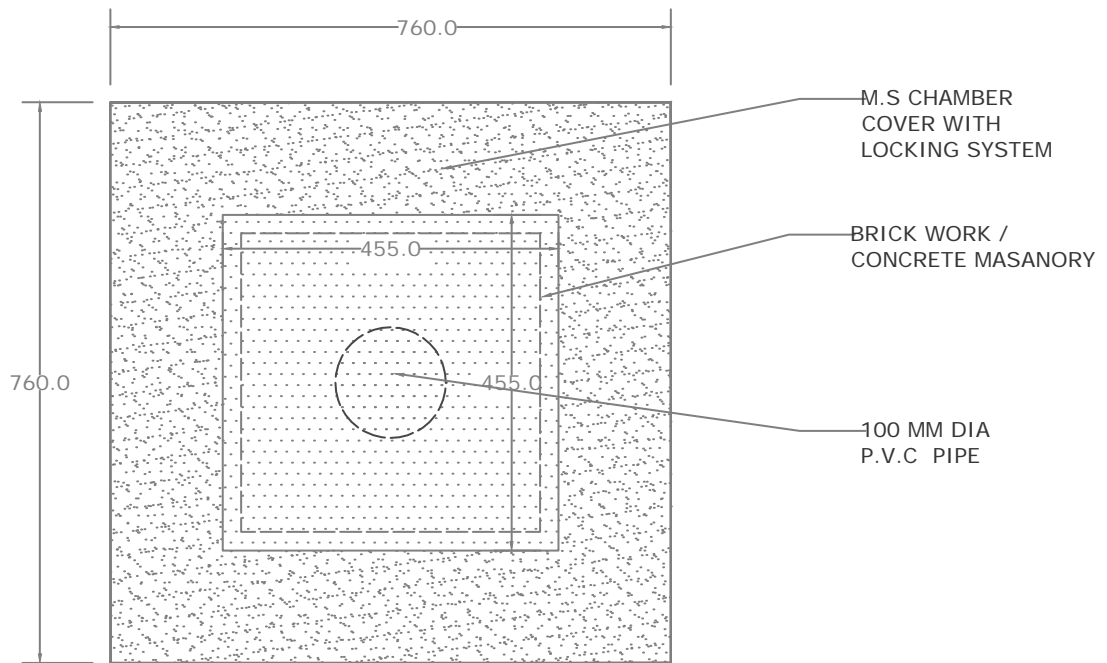


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-1

BT-1

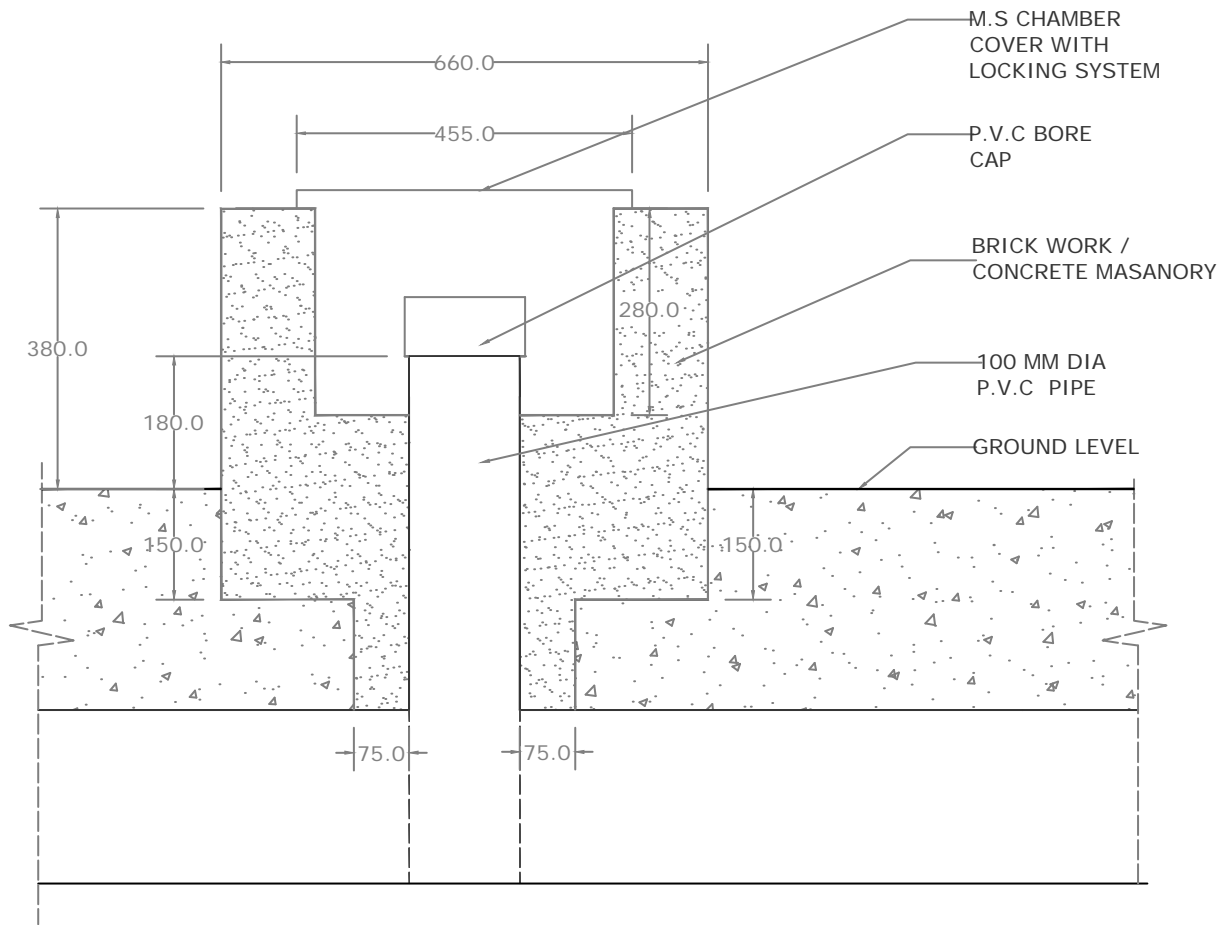


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-2

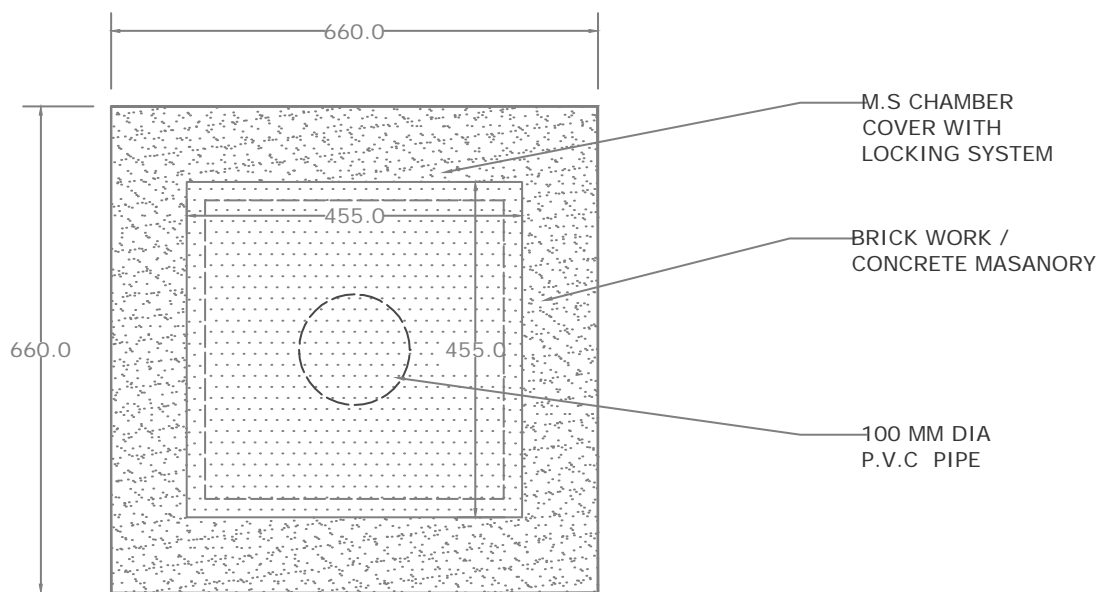


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-2

BT-2

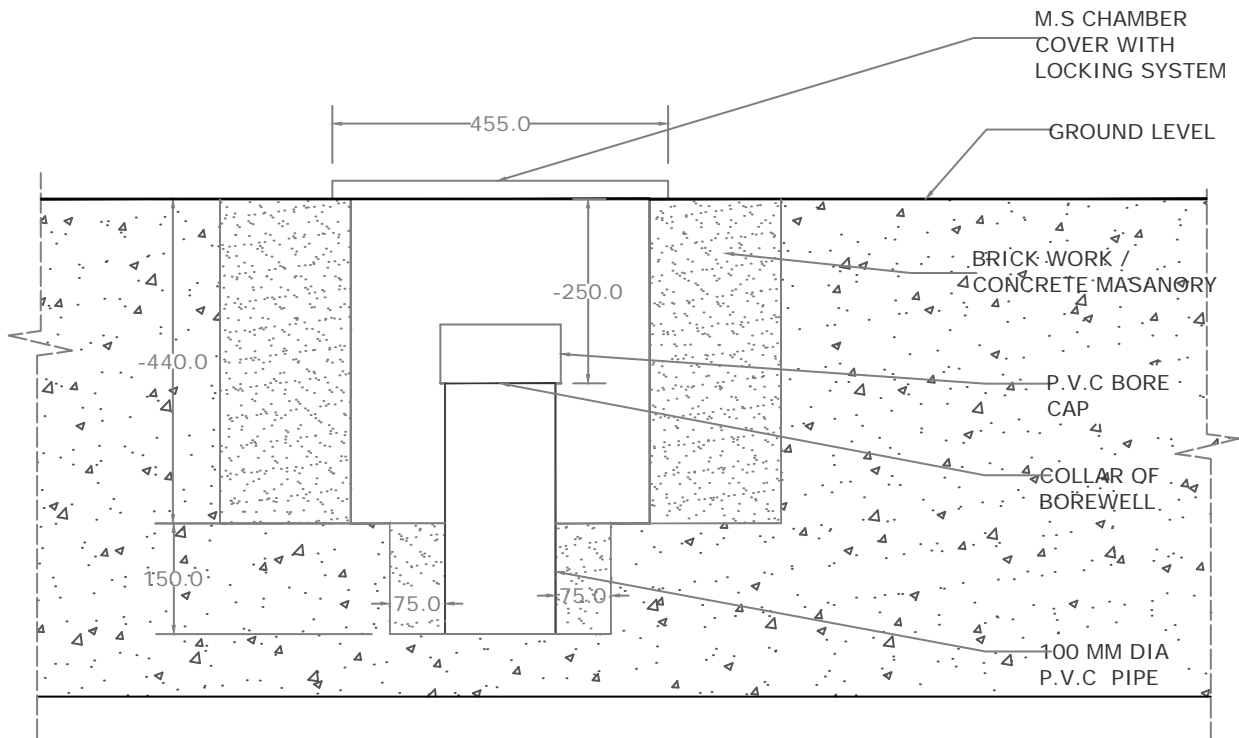


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-3

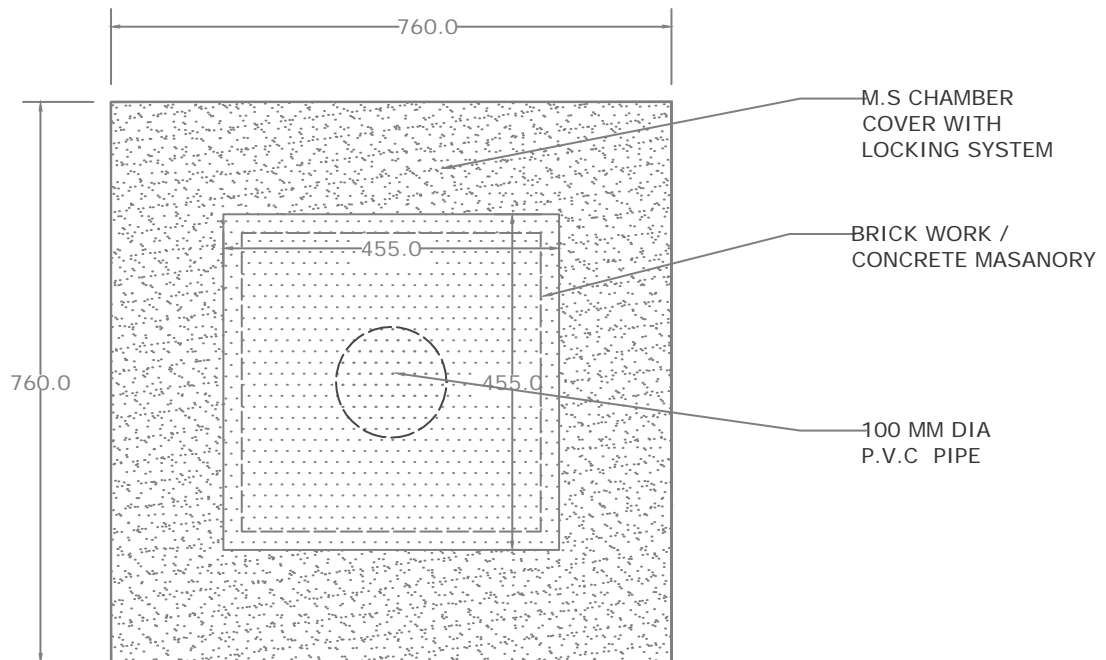


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-3

BT-3

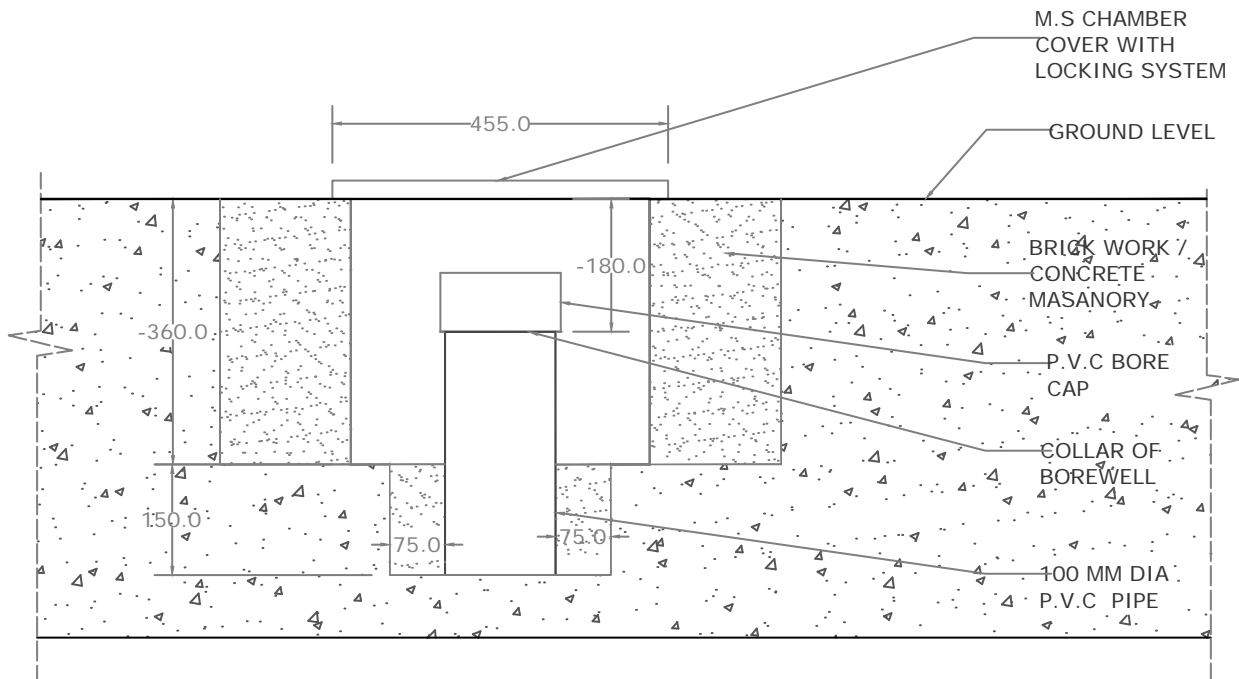


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-4

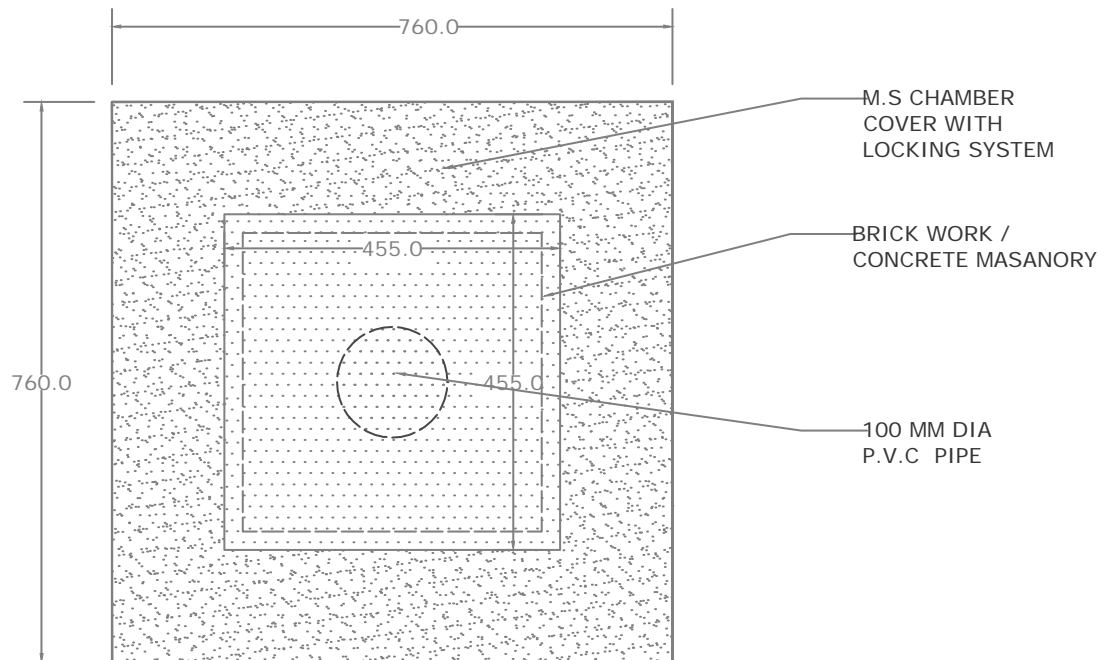


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-4

BT-4

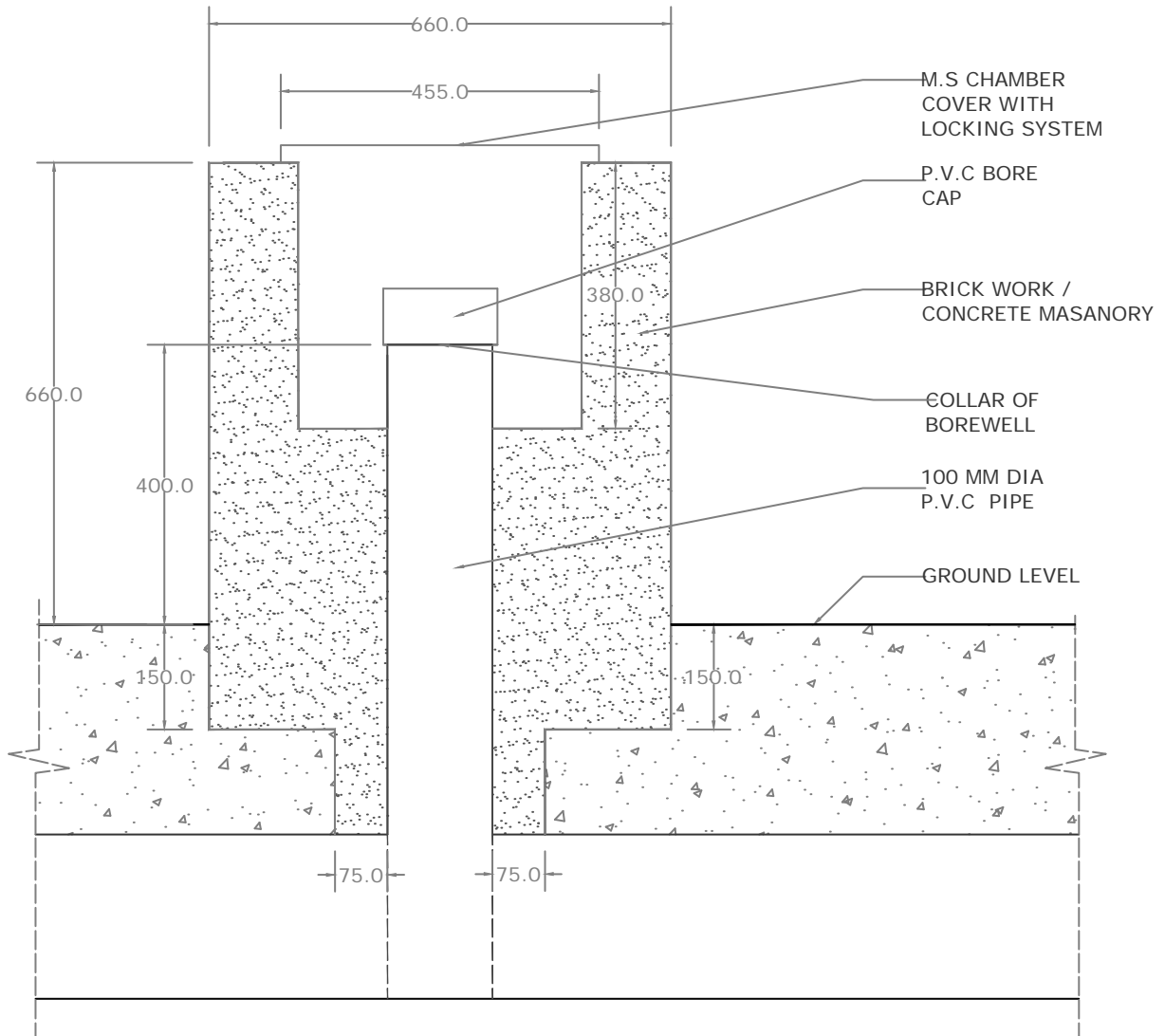


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-5

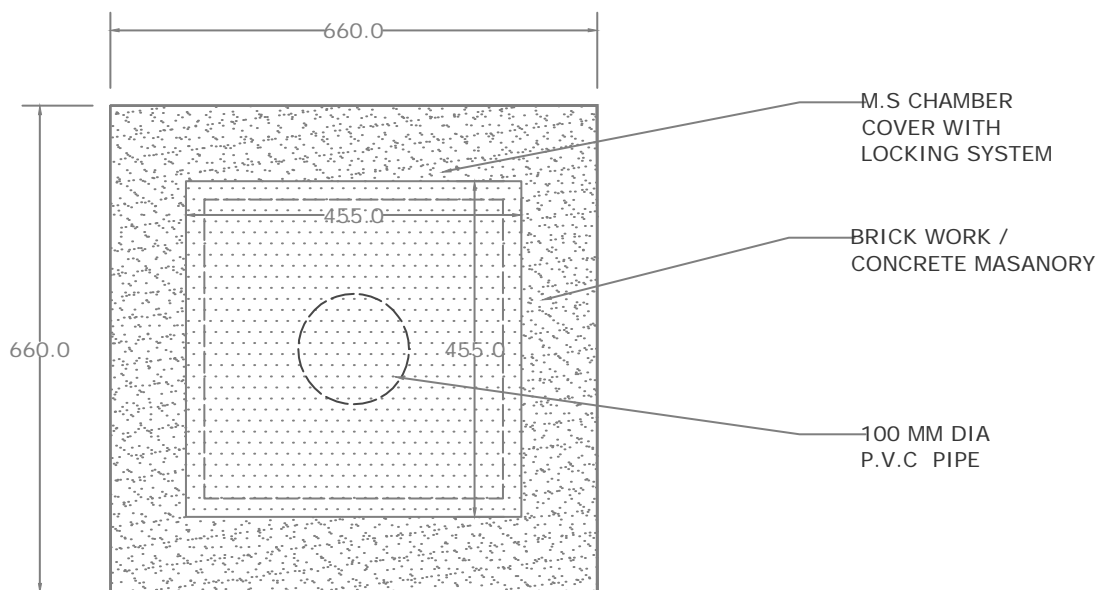


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-5

BT-5

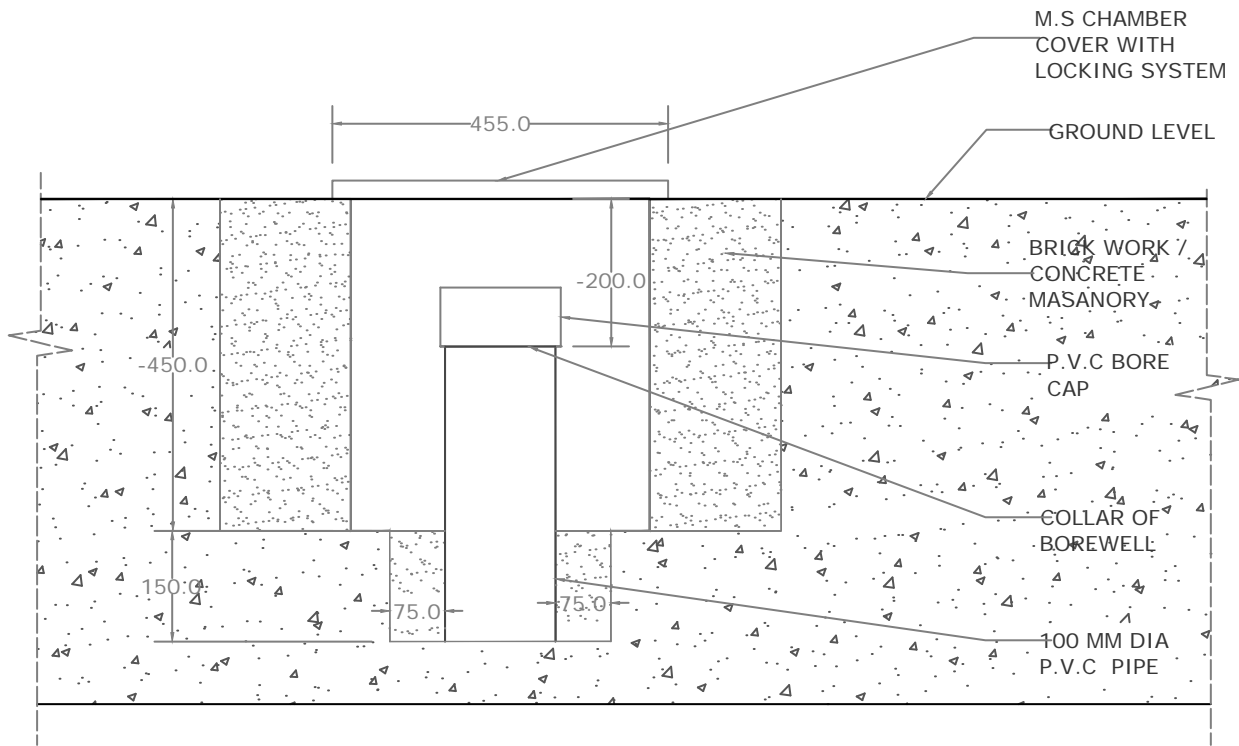


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-6

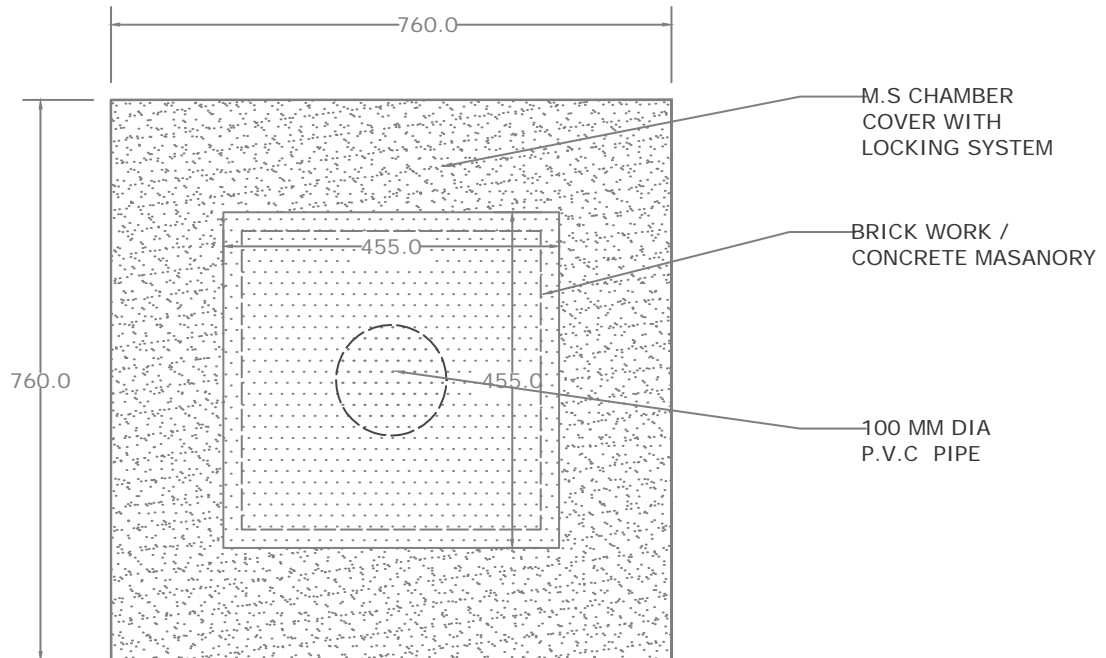


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-6

BT-6

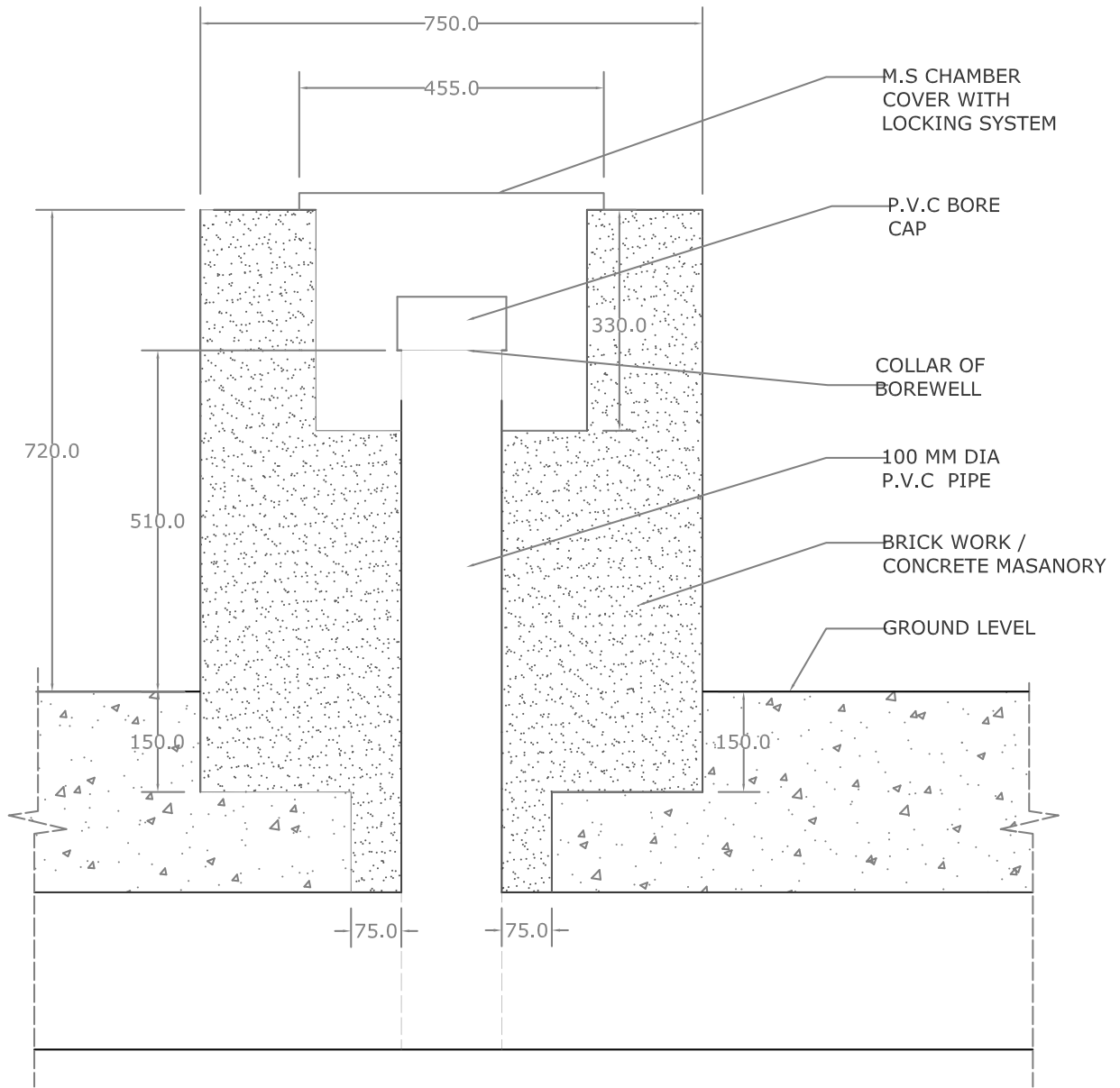


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-7

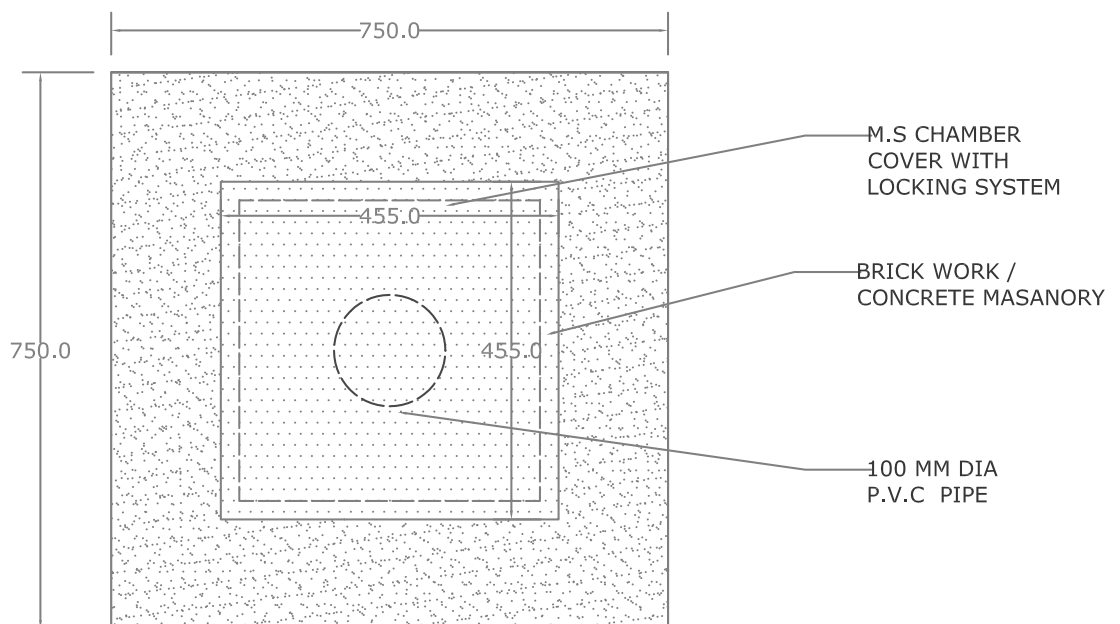


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL BT-7

BT-7

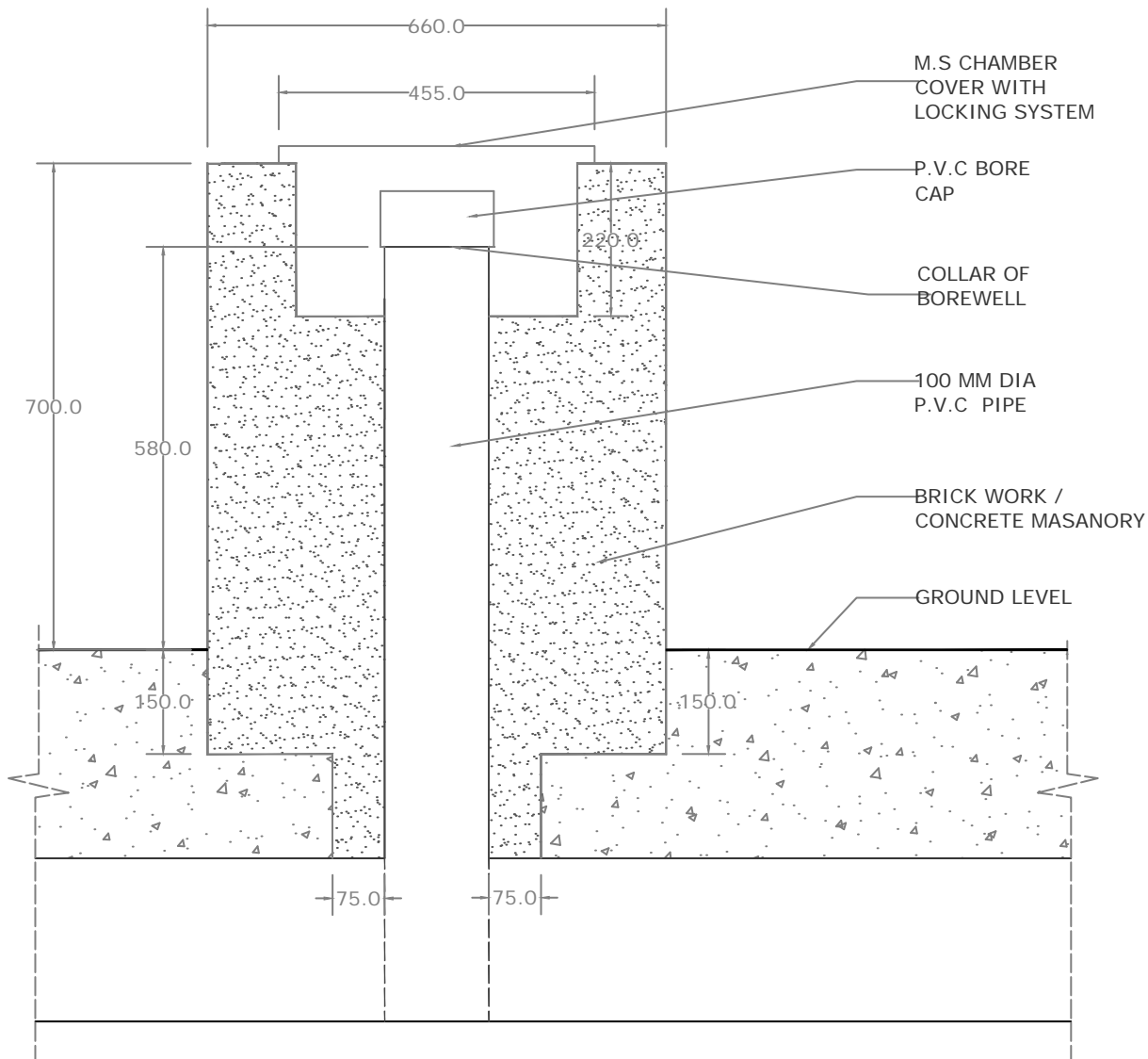


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-1

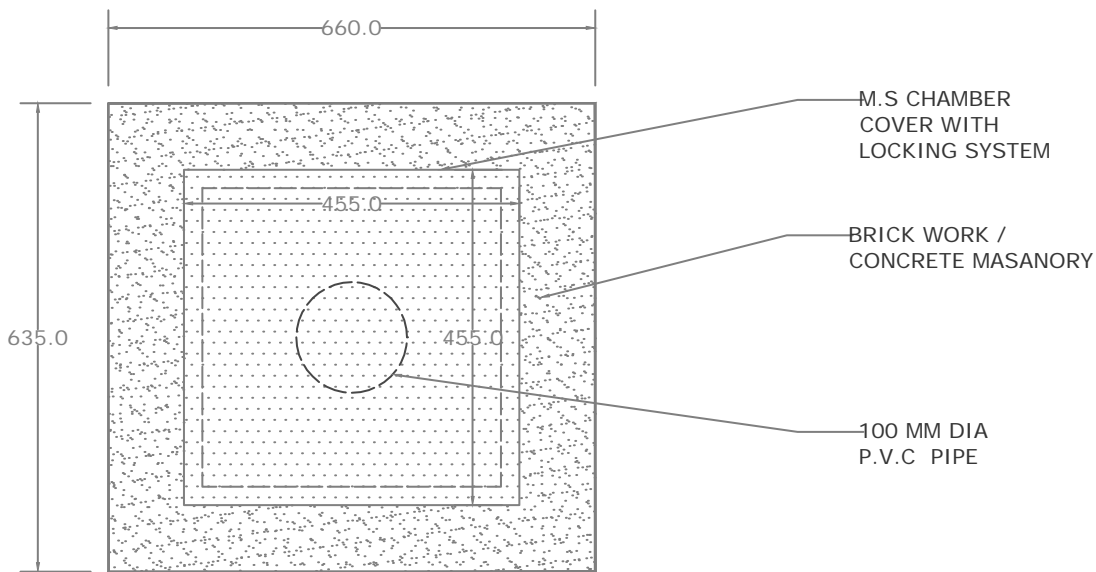


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC- 1

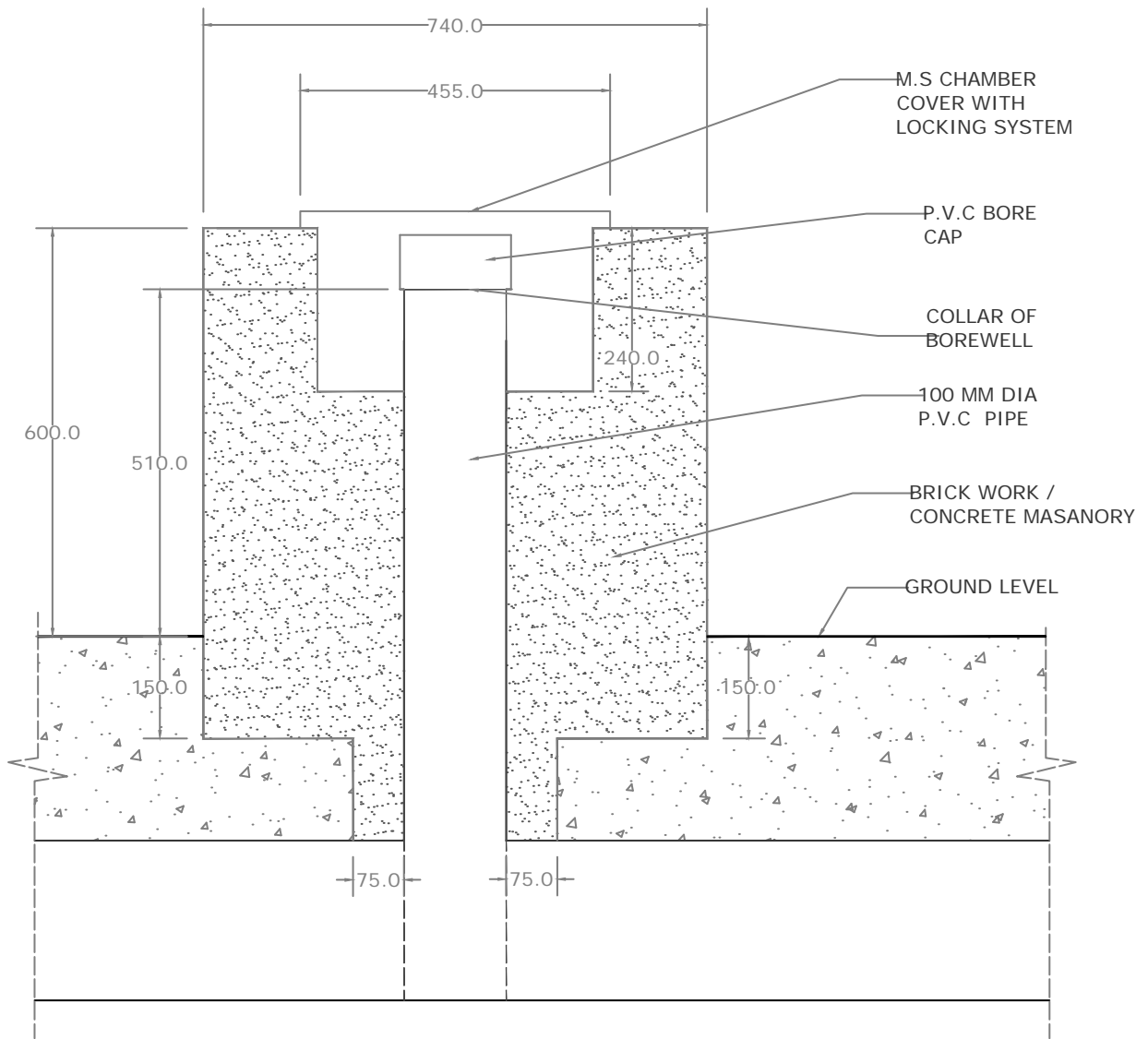
CC- 1



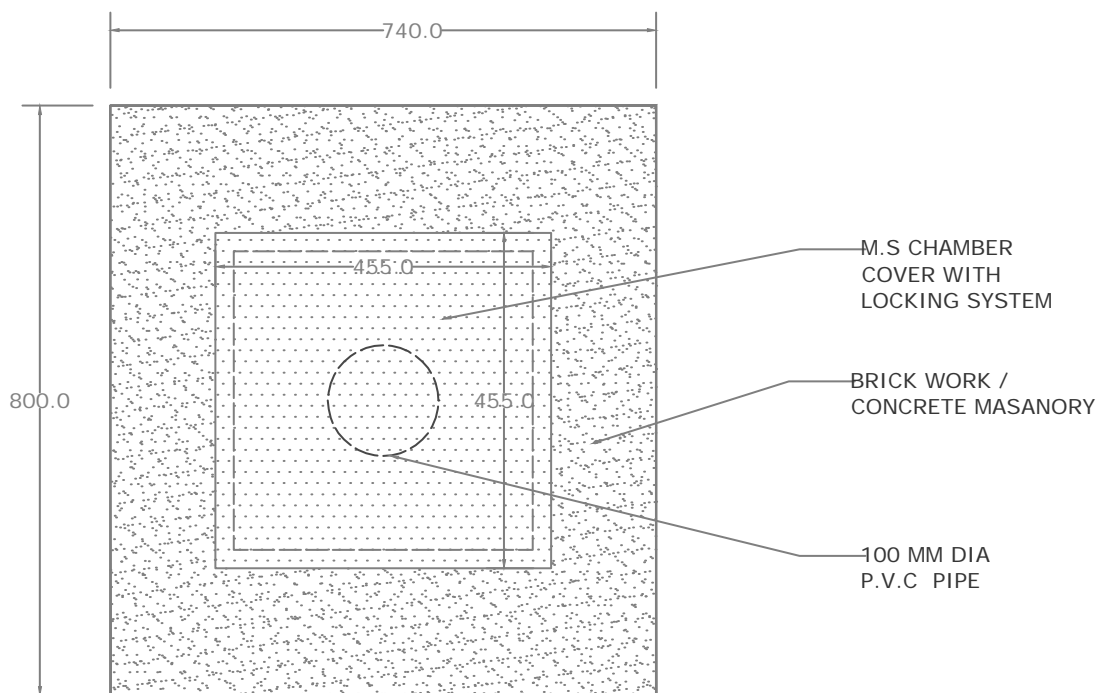
CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-2



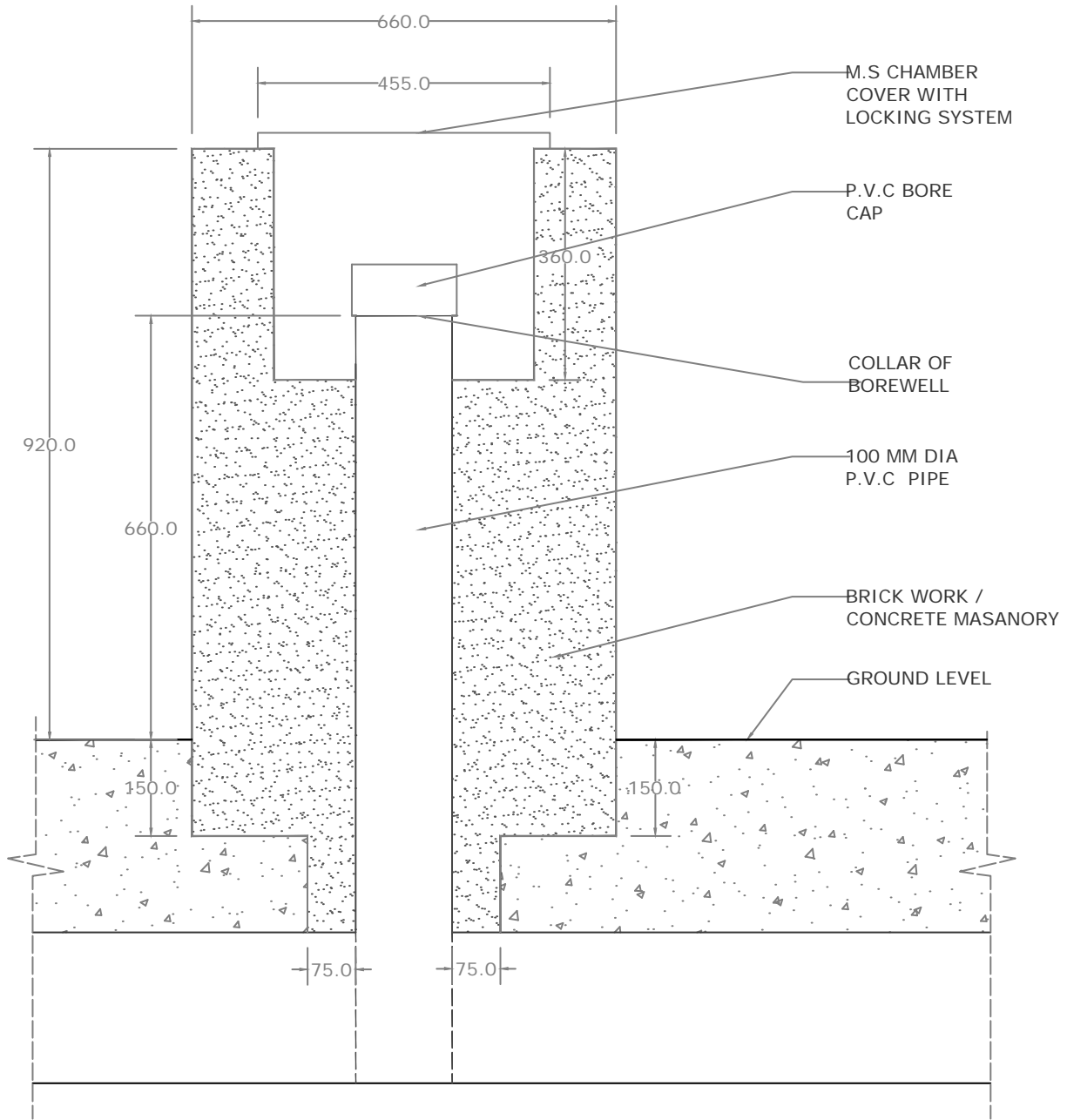
TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-2



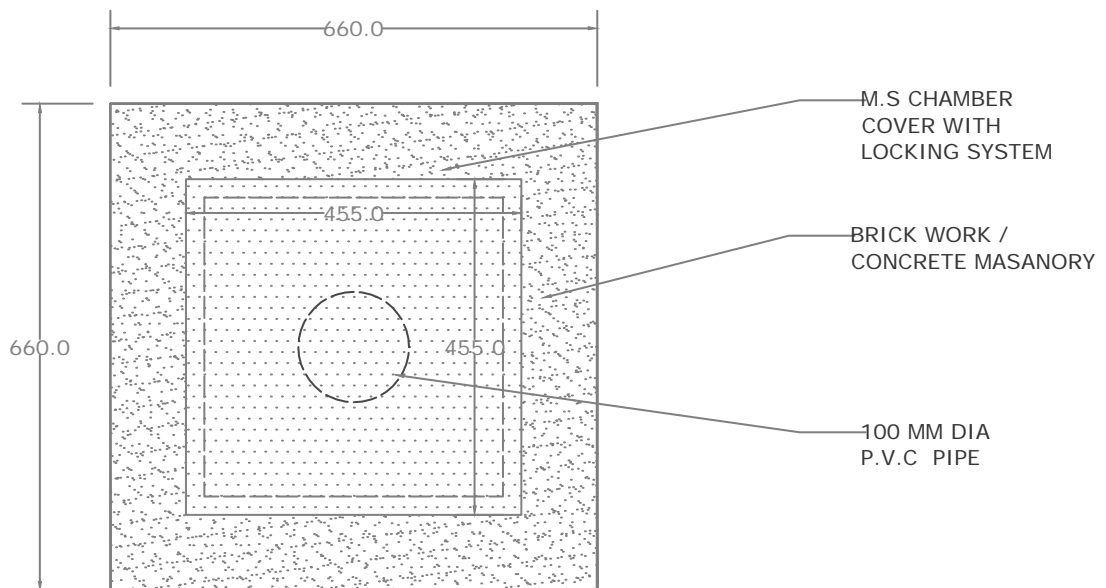
CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-3



TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-3

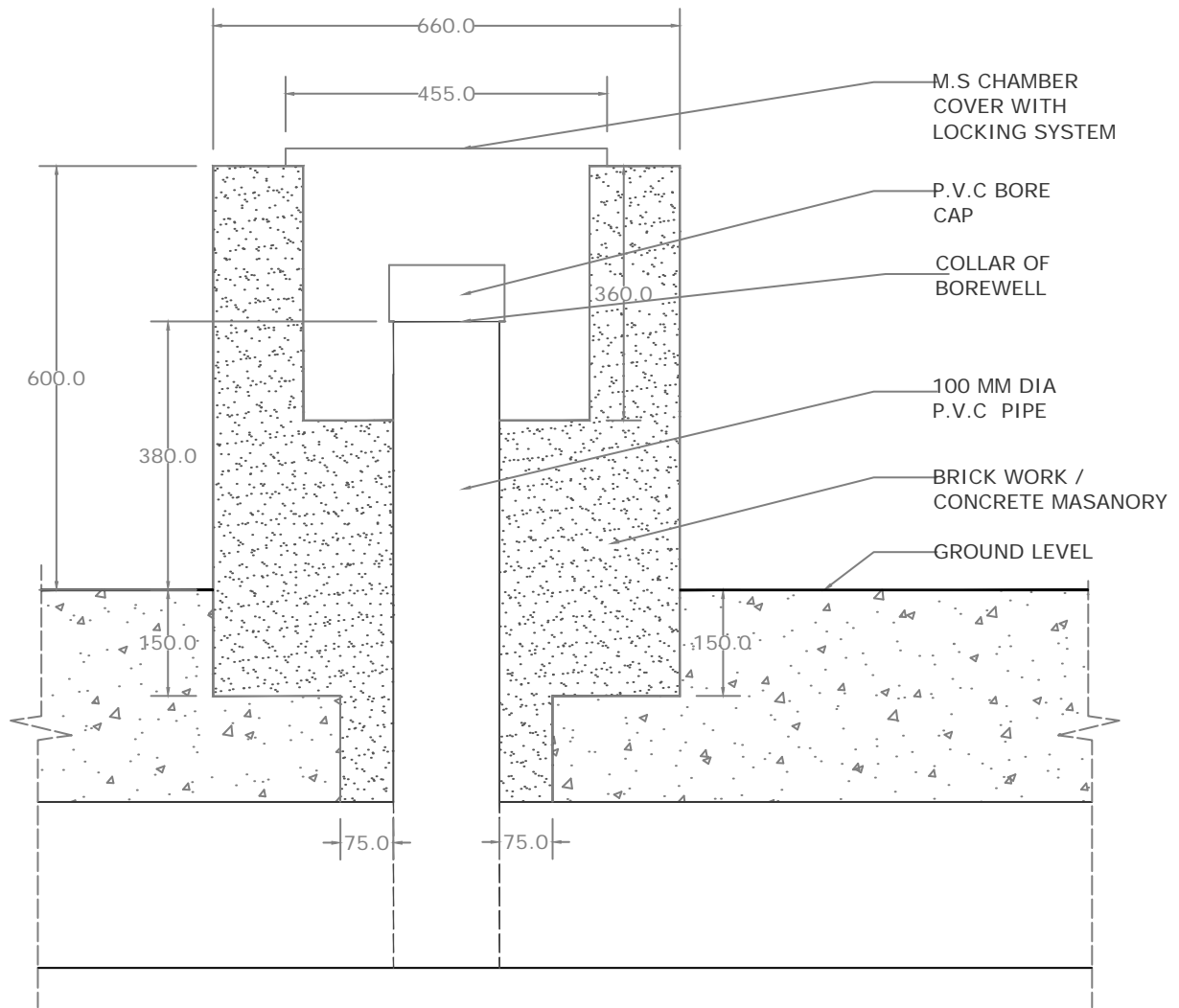


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-4

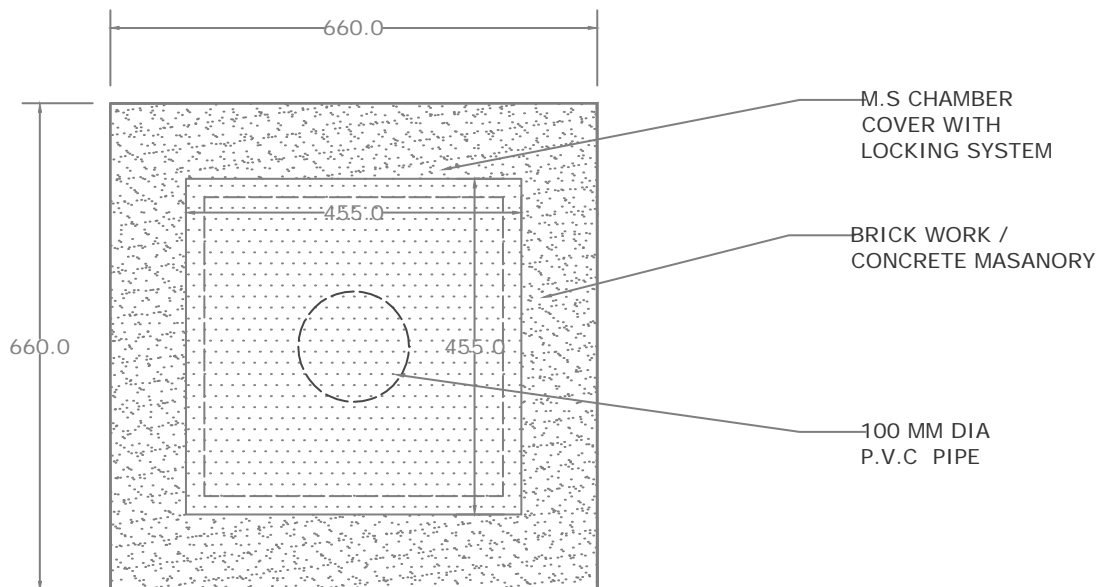


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC- 4

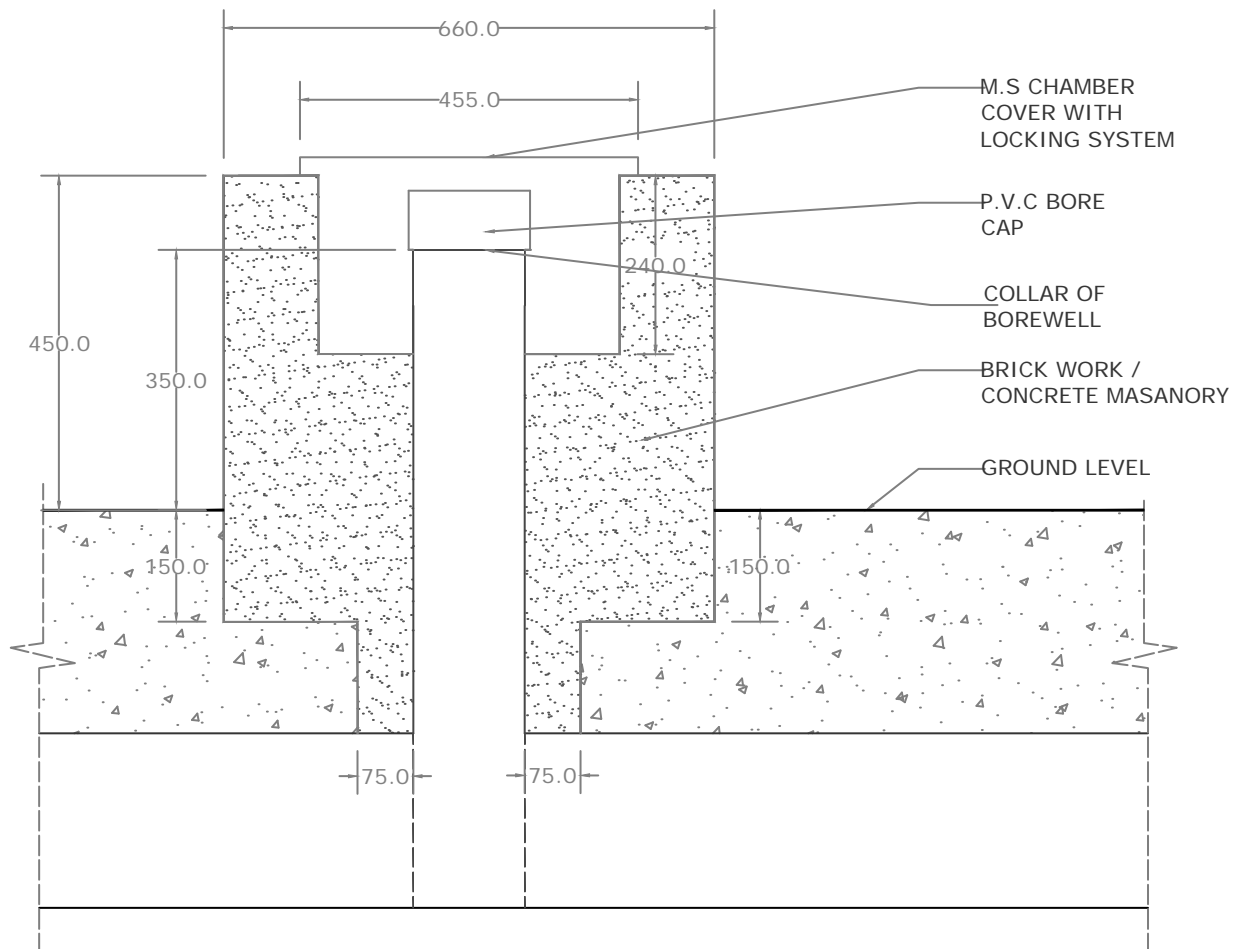
CC- 4



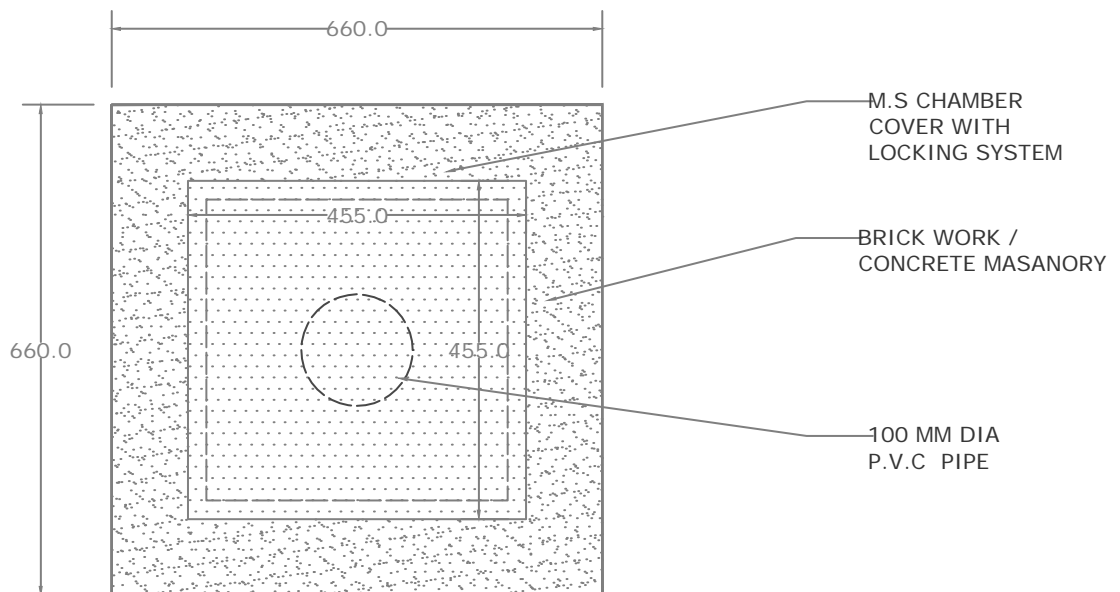
CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-5



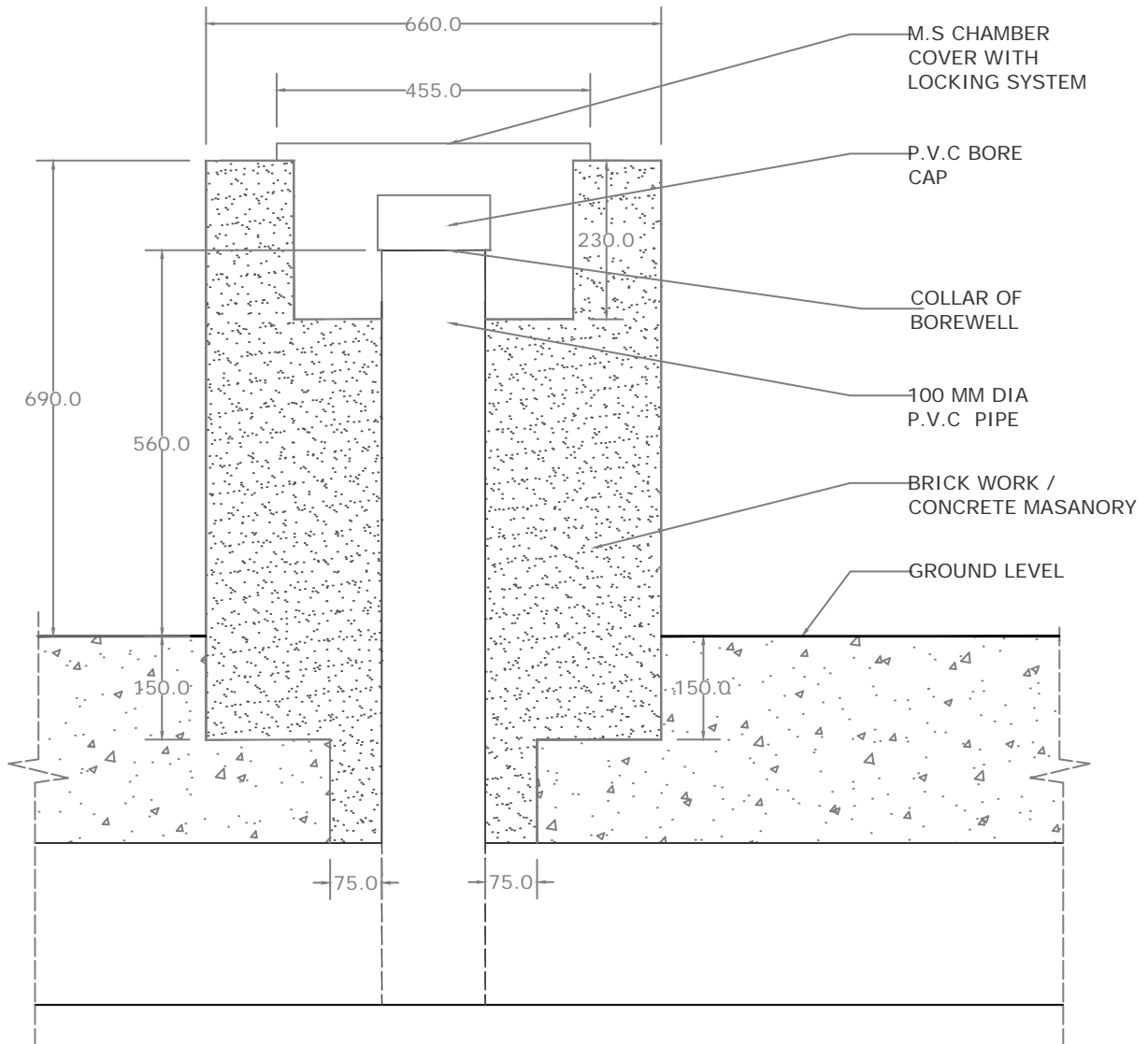
TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-5



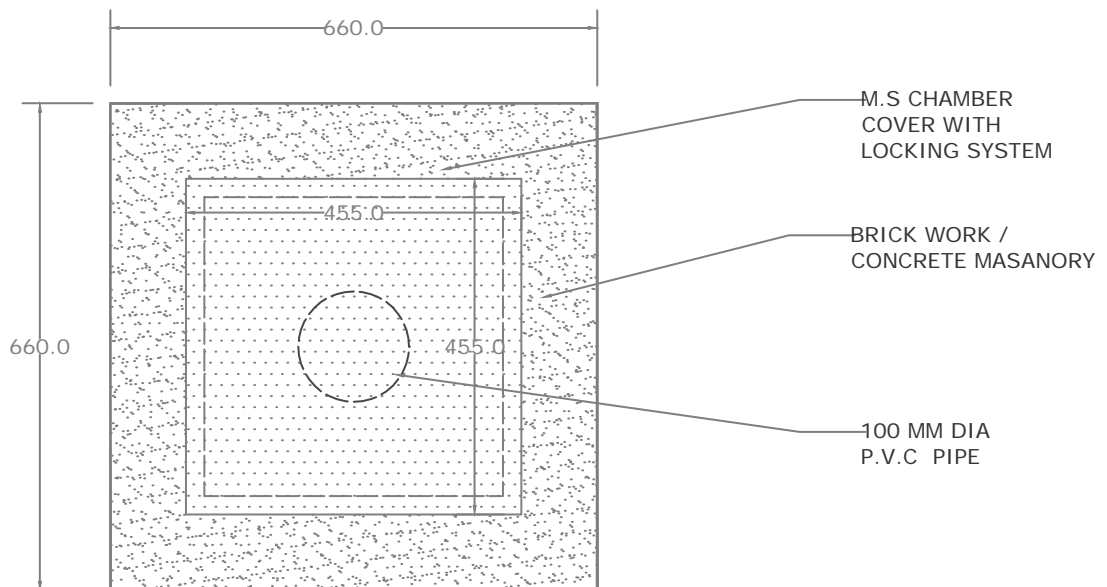
CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-6



TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-6

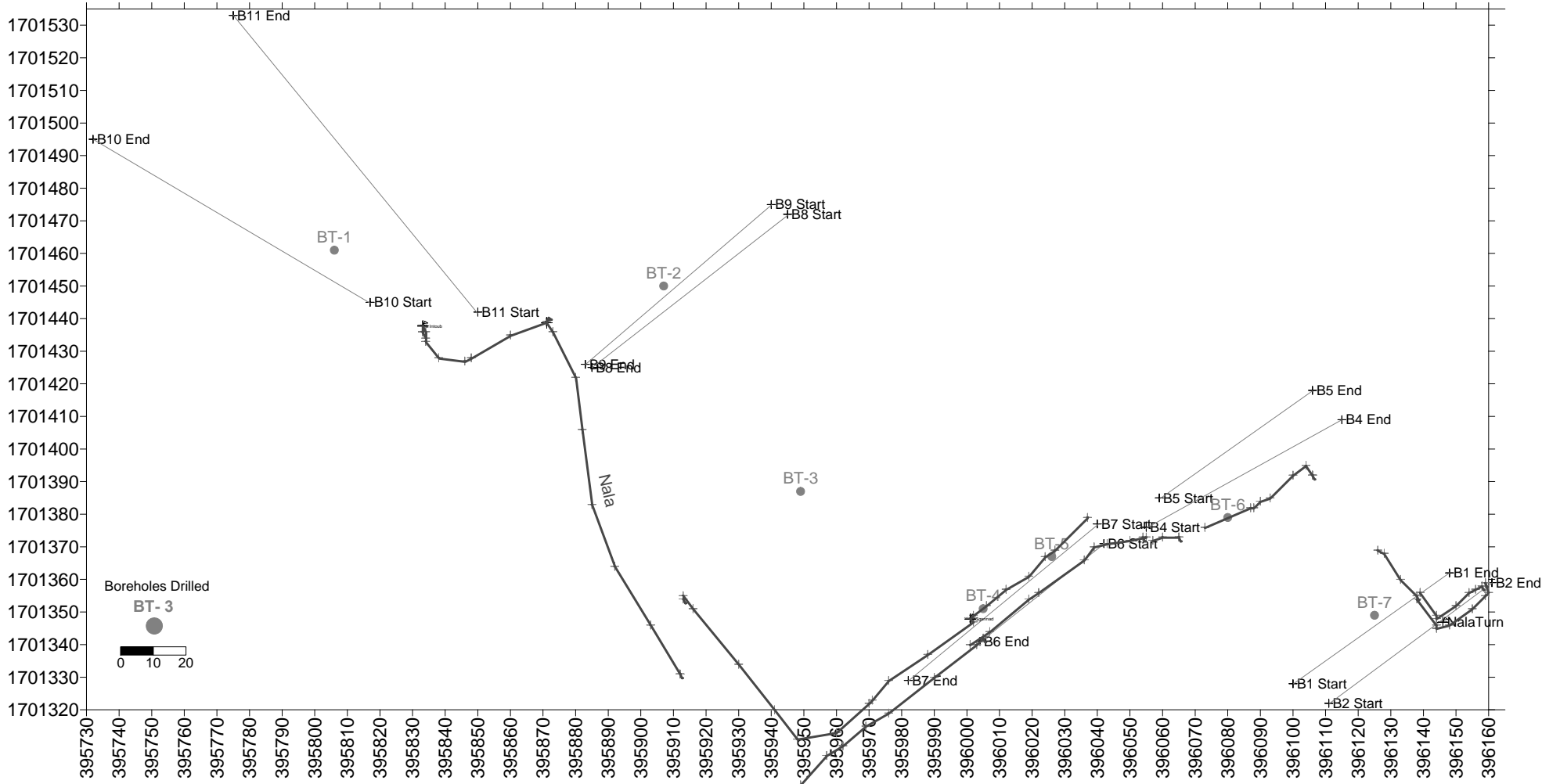


CROSS SECTION OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-7

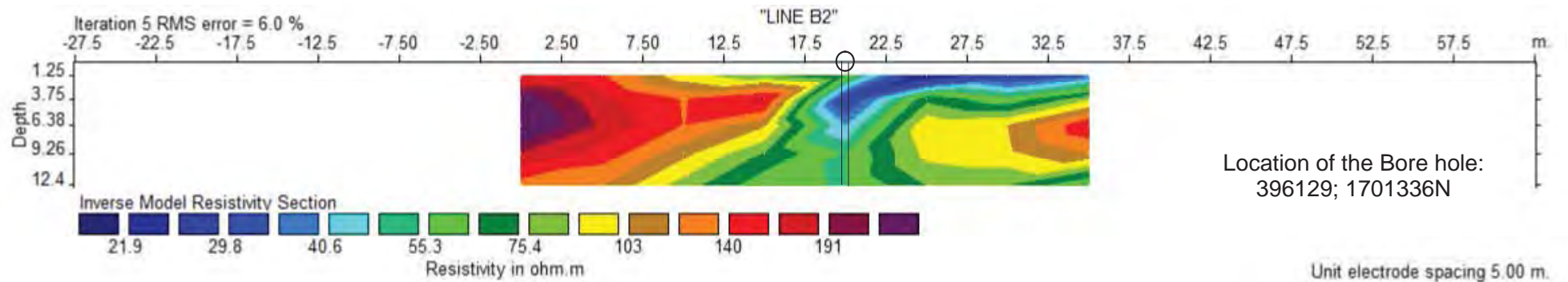
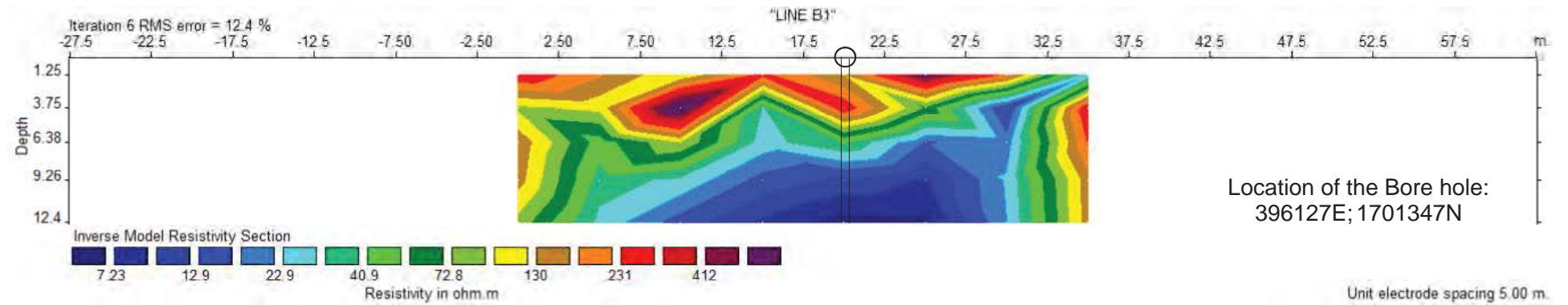


TOP PLAN OF CHAMBER FOR BOREWELL CC-7

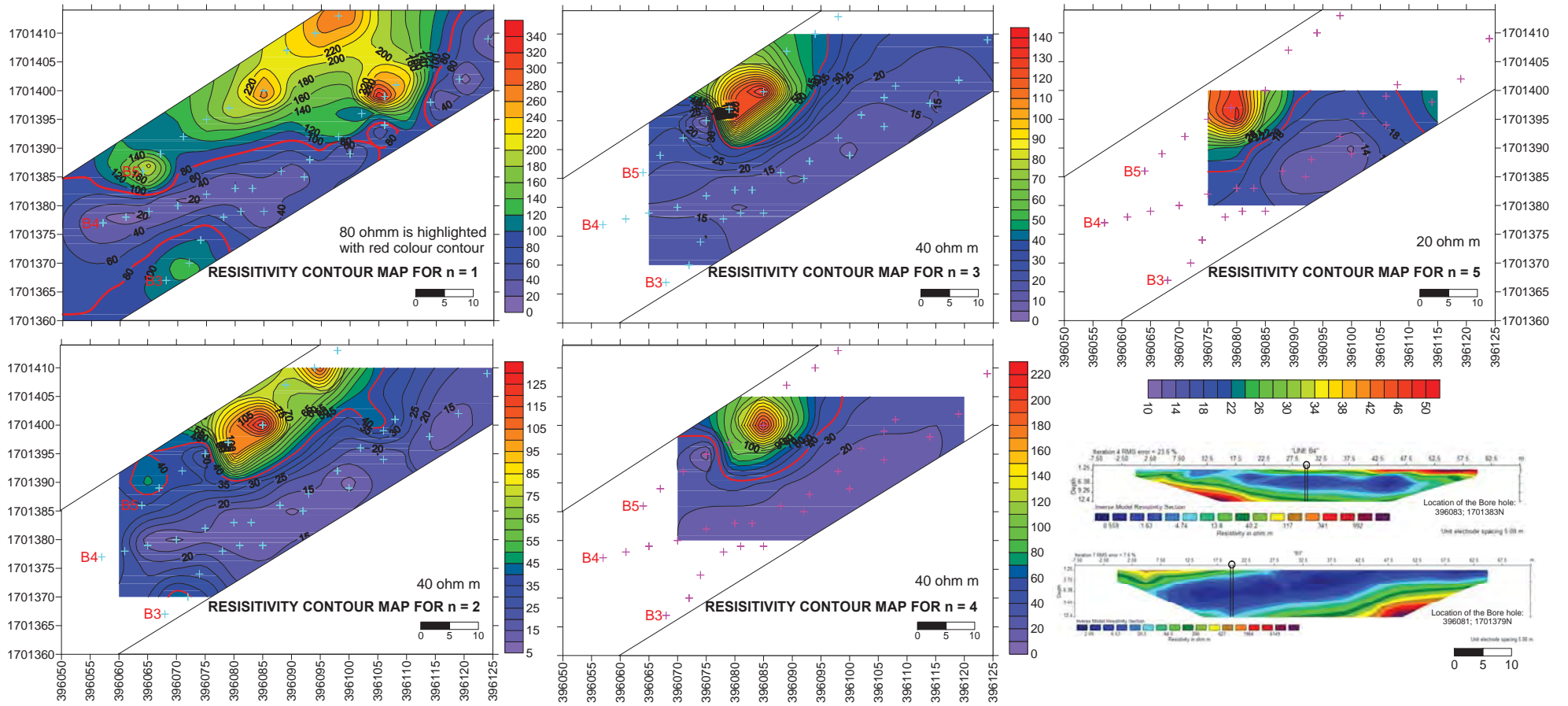
LAYOUT OF GEOPHYSICAL TRAVERSES AT BETHORA AREA, GOA



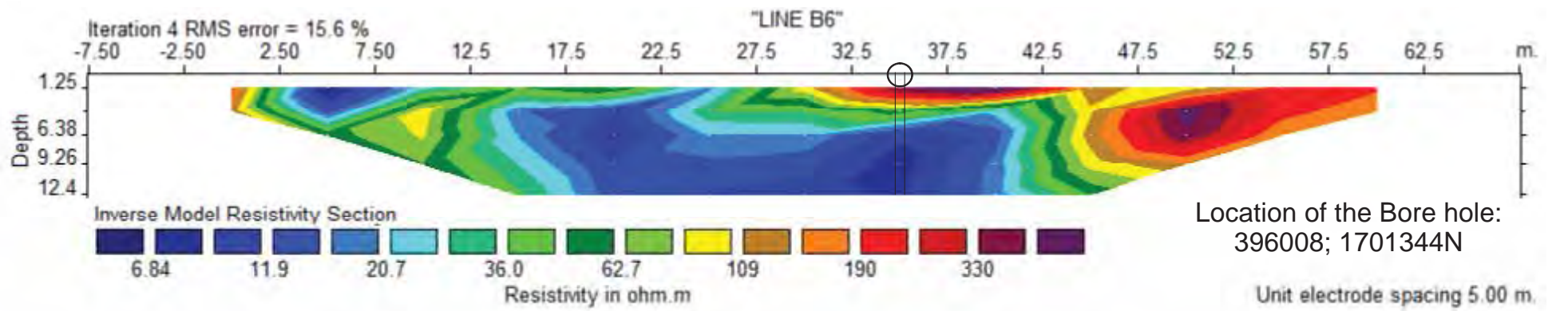
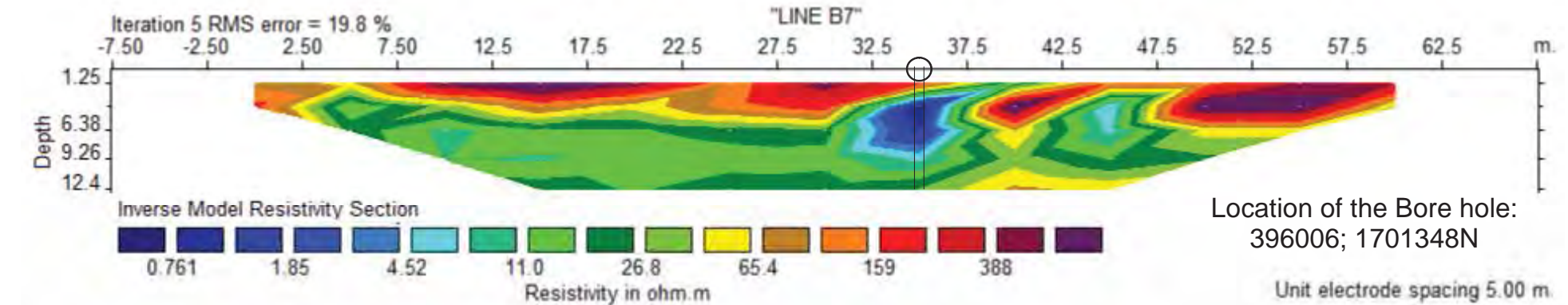
GEO-ELECTRICAL SECTIONS ALONG LINES B1 AND B2



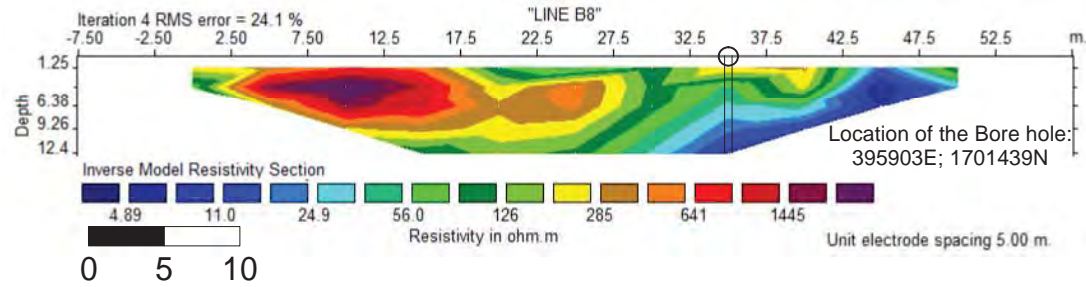
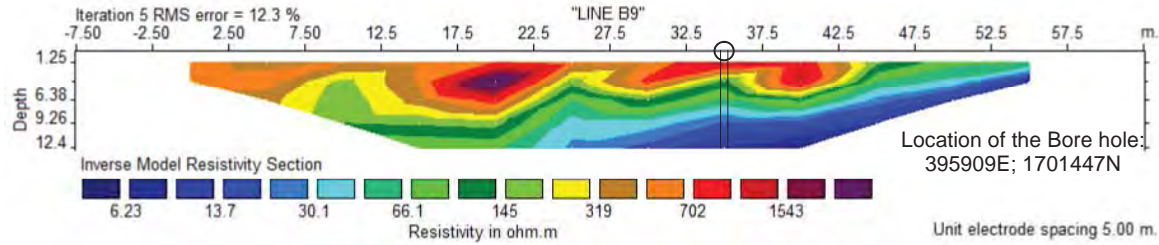
APPARENT RESISTIVITY CONTOUR MAPS ALONG LINES B3, B4 AND B5 FOR n = 1, 2, 3, 4, 5 and a = 5m



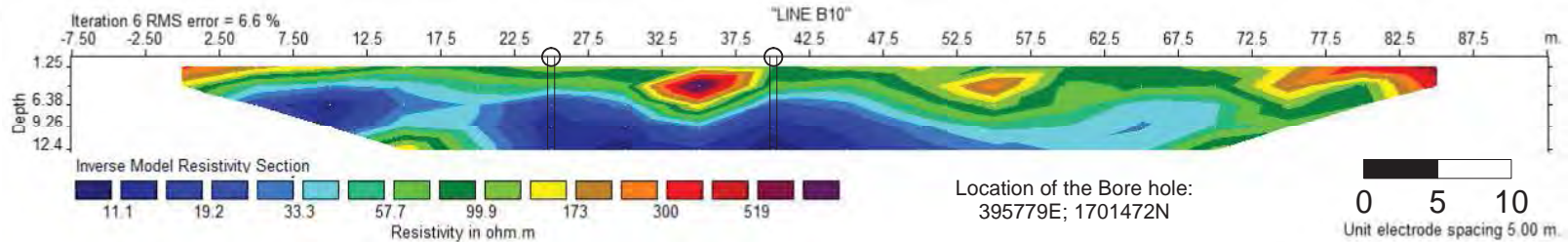
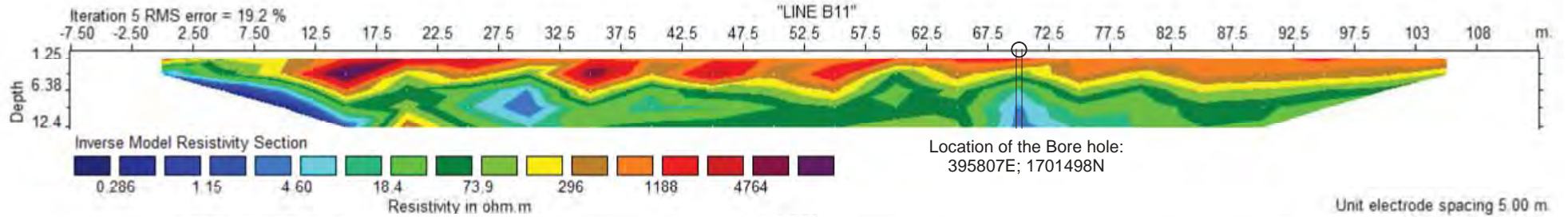
GEO-ELECTRICAL SECTIONS ALONG LINES B6 AND B7



GEO-ELECTRICAL SECTIONS ALONG LINES B8 AND B9

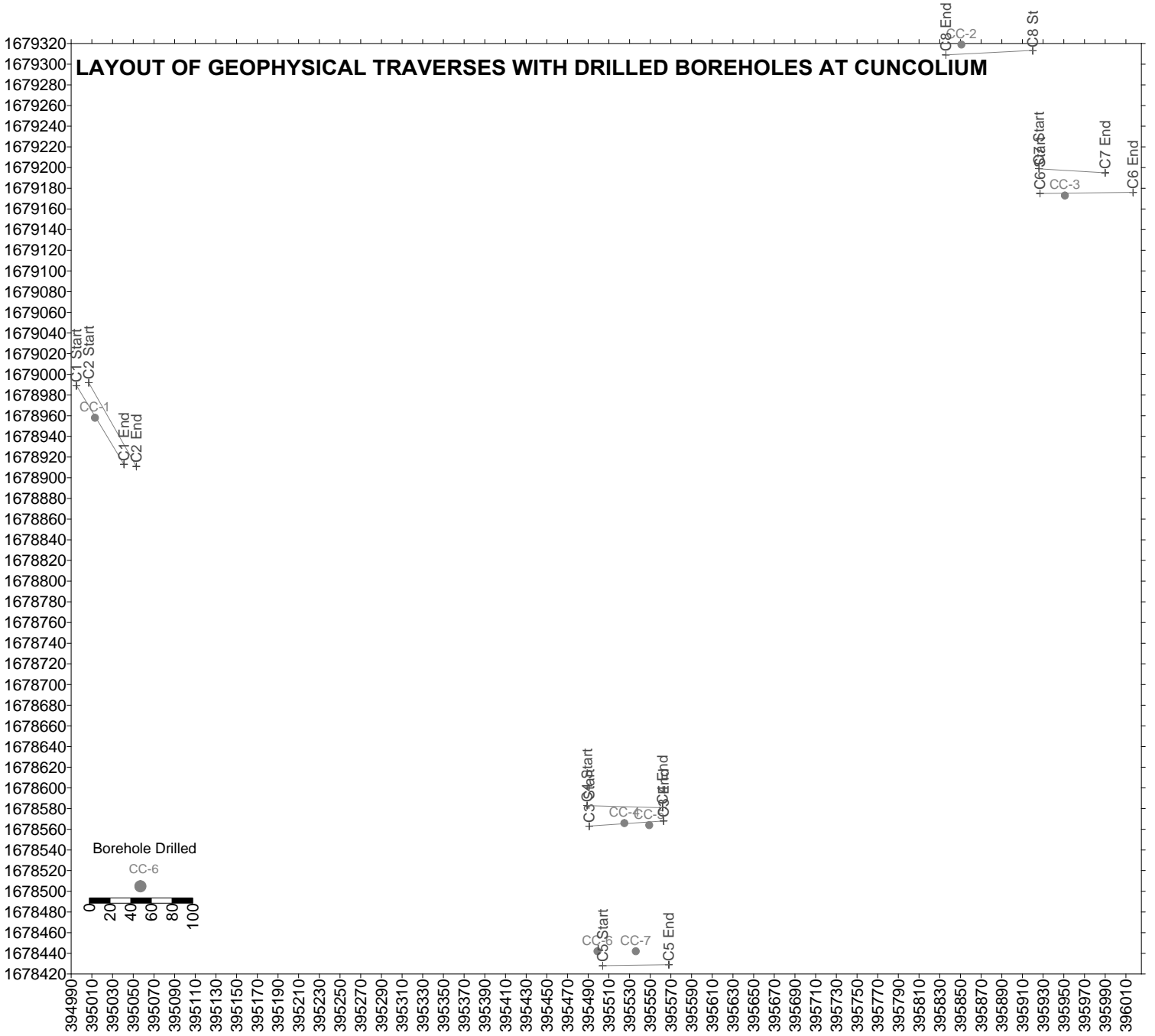


GEO-ELECTRICAL SECTIONS ALONG LINES B10 AND B11

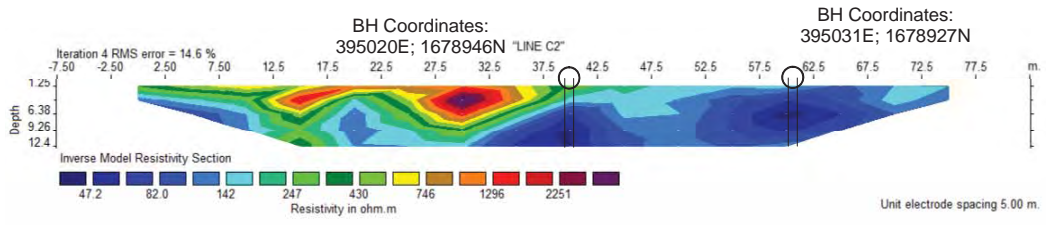
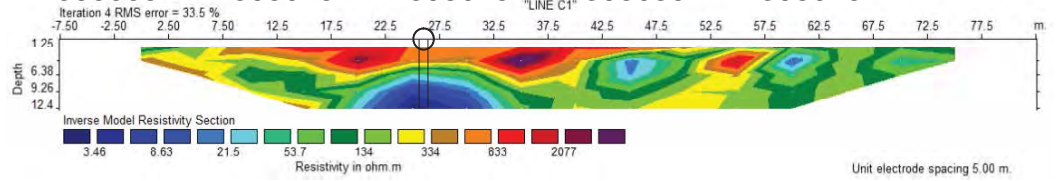
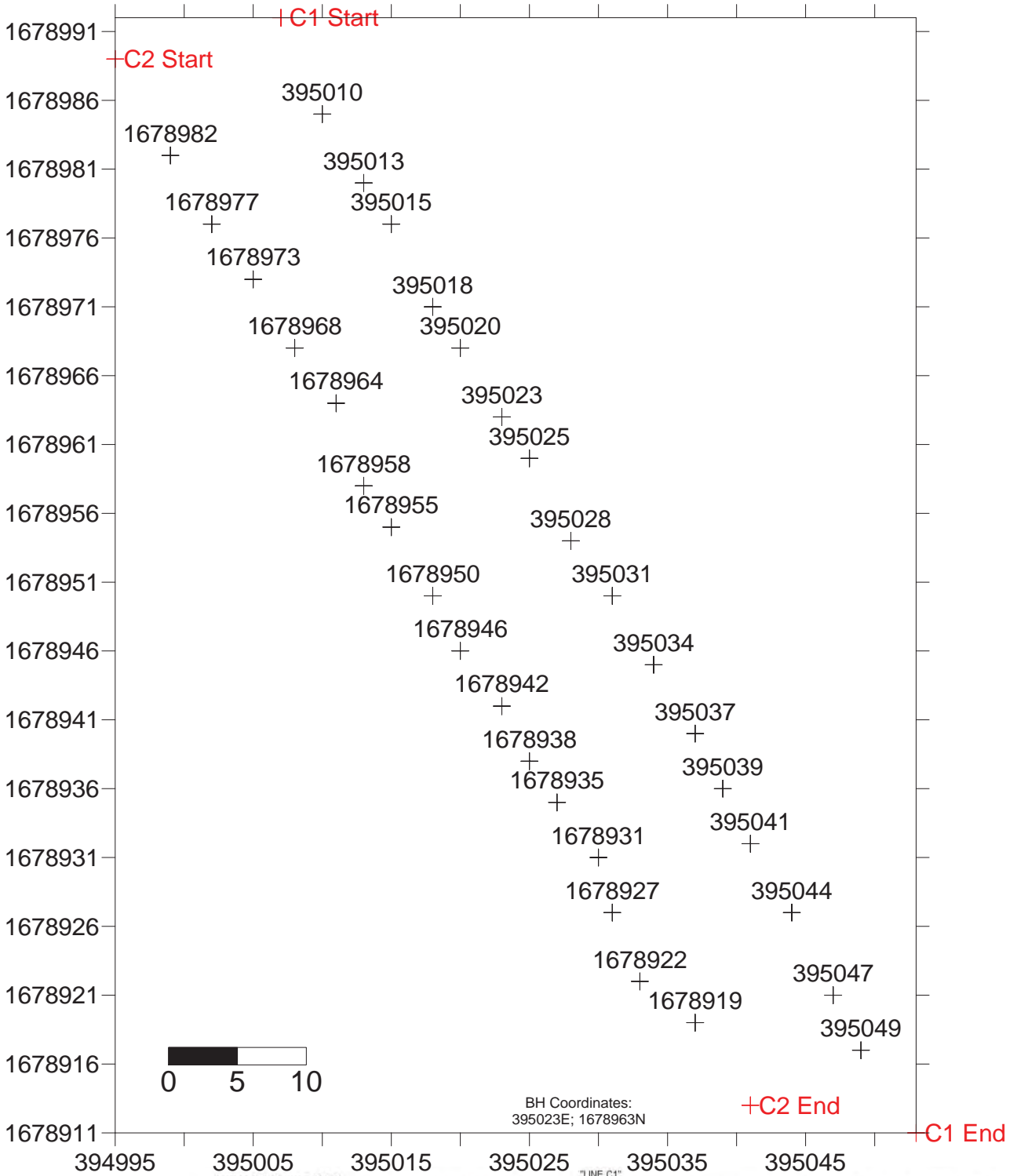


Location of the Bore hole:
395793E; 1701463N

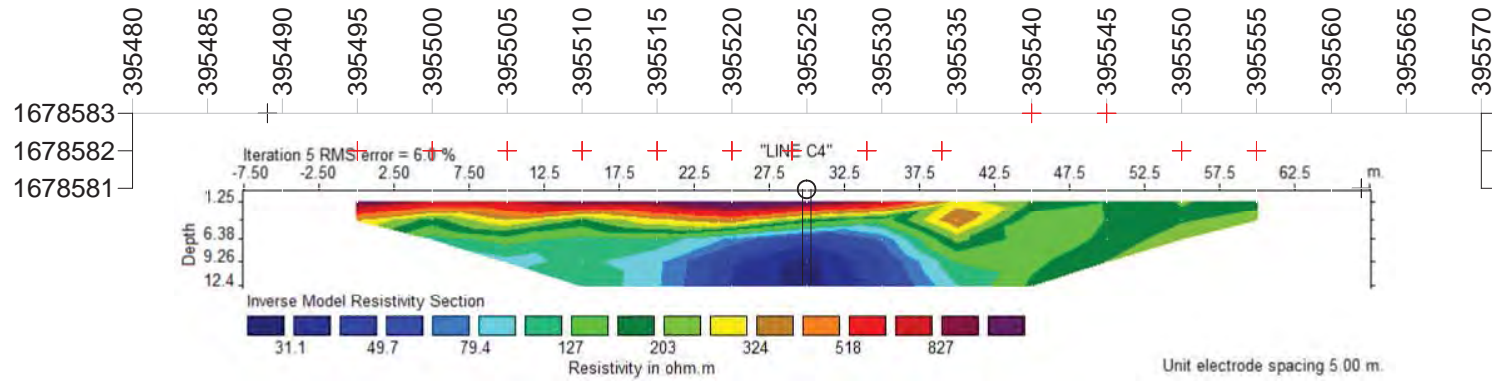
LAYOUT OF GEOPHYSICAL TRAVERSES WITH DRILLED BOREHOLES AT CUNCOLIUM



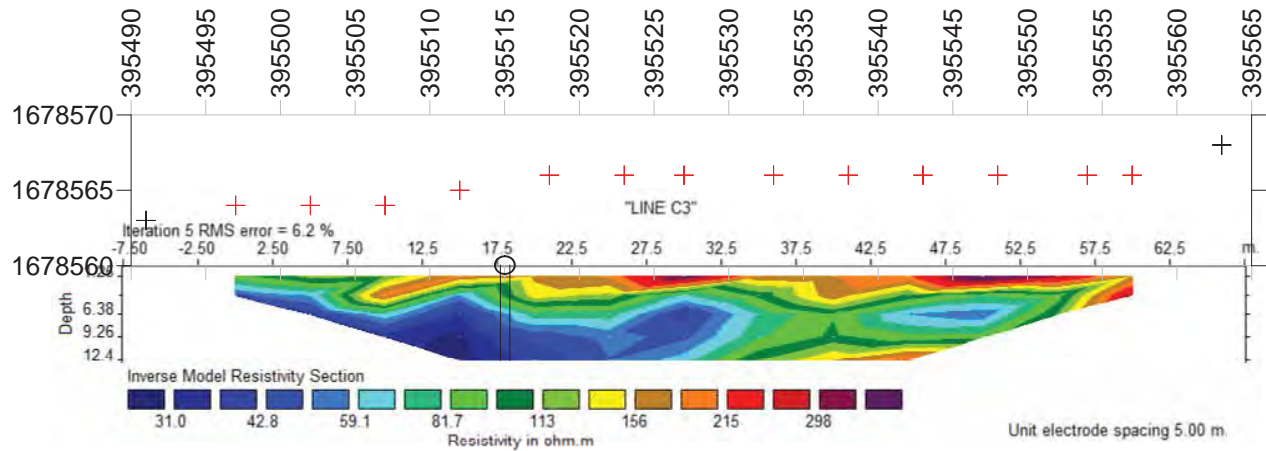
GEO-ELECTRICAL SECTION ALONG LINES C1, C2



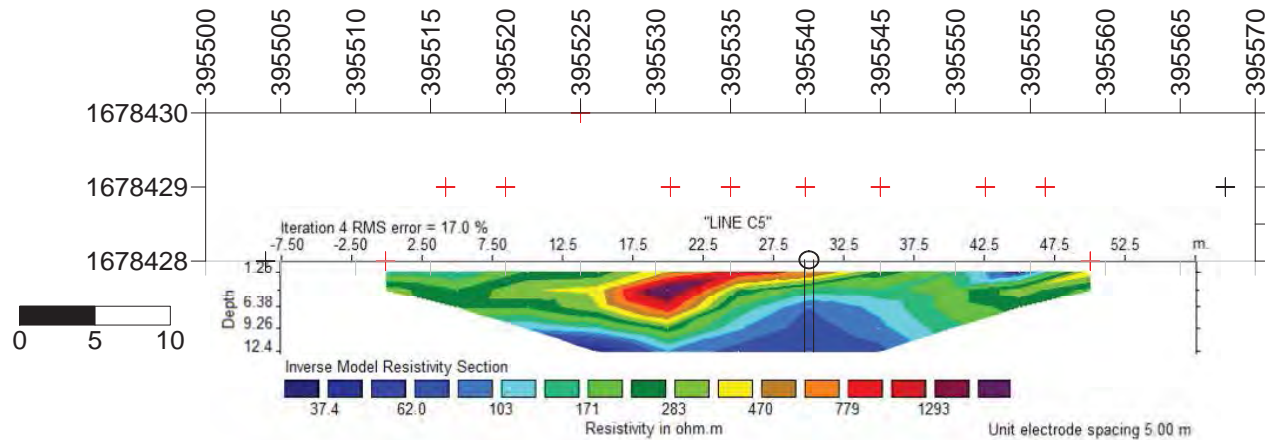
GEO-ELECTRICAL SECTION ALONG LINES C4, C3 and C5



Location of the Bore hole: 395525E; 1678582N

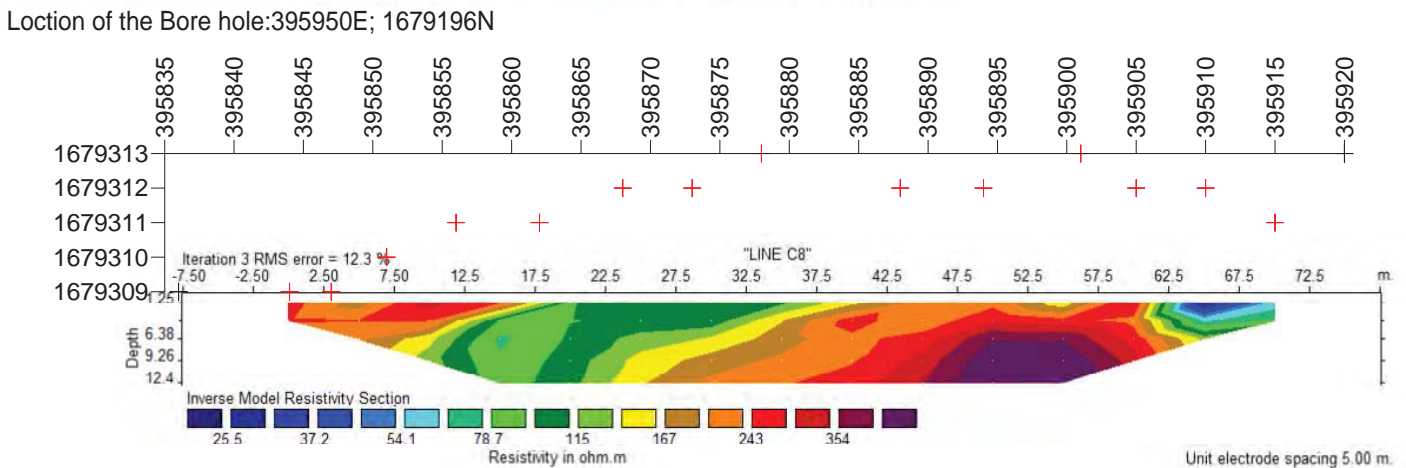
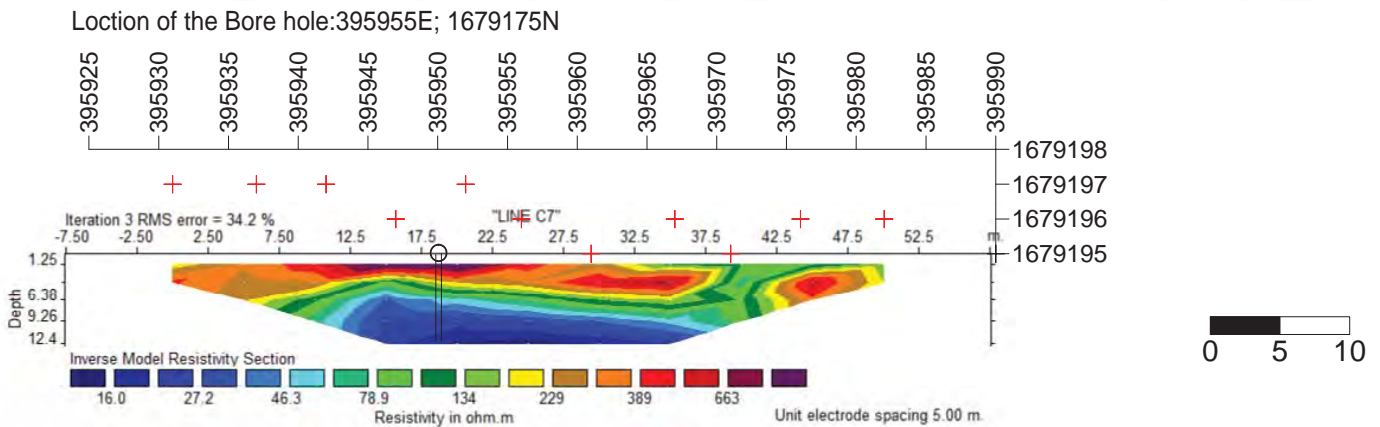
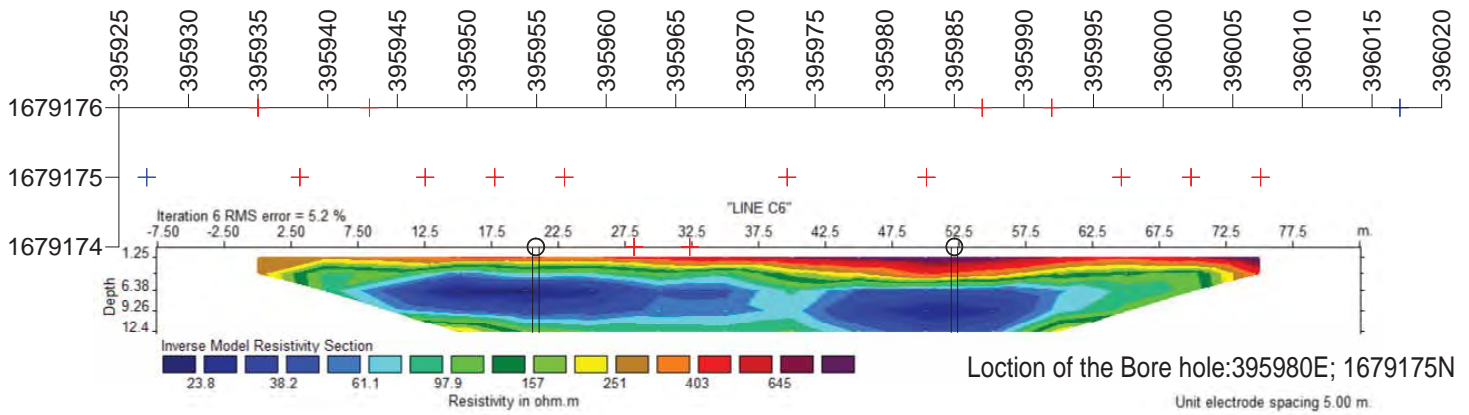


Location of the Bore hole: 395515E; 1678565N



Location of the Bore hole: 395540E; 1678429N

GEO-ELECTRICAL SECTION ALONG LINES C6, C7 and C8



- GETFLOWS™ シミュレーション報告書
((株)地圏環境テクノロジー)

独立行政法人 国際協力機構 (JICA)

平成 24 年度 第 1 回

普及・実証事業

インド共和国

バイオレメディエーションによる

地下水浄化普及・実証事業

ゴア州 サル川流域水循環解析

報告書

平成 28 年 3 月

(2016 年)

アサヒ地水探査株式会社

株式会社地圏環境テクノロジー

目 次

1. 解析業務の概要	1
1.1. 目的	1
1.2. 統合型水循環解析.....	1
1.3. 統合型水循環解析ソフトウェア GETFLOWS®.....	2
1.4. 検討の流れ	3
1.5. 解析理論	4
参考文献（第1章）	6
2. 検討対象範囲と検討対象期間の設定.....	7
2.1. 検討対象範囲の設定.....	7
2.2. 検討対象期間の設定.....	8
3. 資料収集・整理	9
3.1. 収集資料の使用目的.....	9
3.2. 収集資料の信頼性確保.....	9
3.3. 気象	9
3.3.1. 降水量	9
3.3.2. 気温	9
3.4. 地形	10
3.5. 土地利用・植生.....	12
3.6. 水利用	14
3.7. 土壌・地質	15
3.8. 水文	17
3.8.1. 水質	17
3.8.2. 地下水位.....	19
4. 解析モデルの構築.....	18
4.1. 格子作成の考え方.....	18
4.1.1. 大気格子.....	18
4.1.2. 地表格子.....	19
4.1.3. 地下格子.....	19
4.2. モデルの空間解像度.....	19
4.3. 平面格子	19
4.4. 地質構造	21
4.4.1. 地形および分布地質.....	21
4.4.2. 水理地質.....	21

4.5.	気象	23
4.6.	土地利用	24
4.7.	沿岸域における海水の影響	26
4.8.	三次元格子モデル	26
5.	解析モデルの検証	27
5.1.	現況再現計算のフロー	27
5.2.	解析モデルの検証	30
6.	人為的な水利用を考慮しない自然状態の再現	31
6.1.	地表水の水深分布	31
6.2.	地表水の流動量分布	33
6.3.	地下水位分布	35
6.4.	帯水層中心付近の塩分濃度	38
6.5.	流跡線	39
7.	人為的な水利用（地下水揚水）を考慮した現況再現	42
7.1.	自然状態の地下水位と揚水を考慮した場合の地下水位との比較	42
7.2.	水収支	45
7.2.1.	水収支の概念	45
7.2.2.	解析領域全体の年間水収支	45
7.2.3.	市街地（都市部）の水収支	47
8.	洪水時の水深分布の再現	52
9.	水循環の視点に立脚したサル川流域への提案	55
9.1.	サル川流域の水循環の特徴	55
9.2.	市街地（都市部）への提案	59
9.2.1.	水利用の視点	59
9.2.2.	排水に関する視点	60
9.3.	海岸部への提案	60
9.3.1.	水利用の視点	60
9.3.2.	排水に関する視点	60
9.4.	耕作地の土地利用計画への提案	61
9.4.1.	水利用	61
9.4.2.	排水	61
9.4.3.	耕作地の土壌管理	61
9.5.	下水処理場（既存）の水質	61
9.5.1.	水利用	63
9.5.2.	水質モニタリングの提案	64

1. 解析業務の概要

1.1. 目的

本解析業務は、インド共和国ゴア州サル川流域を対象として、地域全体の表流水(地表水)と地下水を総合的に捉えた「水循環」の状況について、統合型水循環解析シミュレータ GETFLOWS を用いた解析により可視化する。併せて、利水環境の整備や河川や地下水の汚染対策に有効活用できる資料を提供するものである。

1.2. 統合型水循環解析

広範な地域を対象とした水循環の現象は、降雨や土壌からの蒸発散などの自然現象と、地形改変や河川利水・地下水揚水などの人間活動が複雑に相互に関与した結果である。統合型水循環解析は、検討対象地域の「地表水と地下水を一体として捉えた水循環の現況」を可視化できるだけでなく、「気候変動や人間活動の変遷を考慮した将来の状況」を設定したシナリオの下で予測することができる。

水循環解析は、降雨から地下への浸透、地表面流動、河川への流出等を一連のシステムとして一体的に捉え解析する(図 1-1)。表流水および地下水からなる水循環の現象は、抽象化した概念や人間の判断をできる限り入れず、流体の振る舞いを規定する物理法則のみに従って忠実に数値化するプロセスを採用することがとりわけ重要となる(1.5 節参照)。

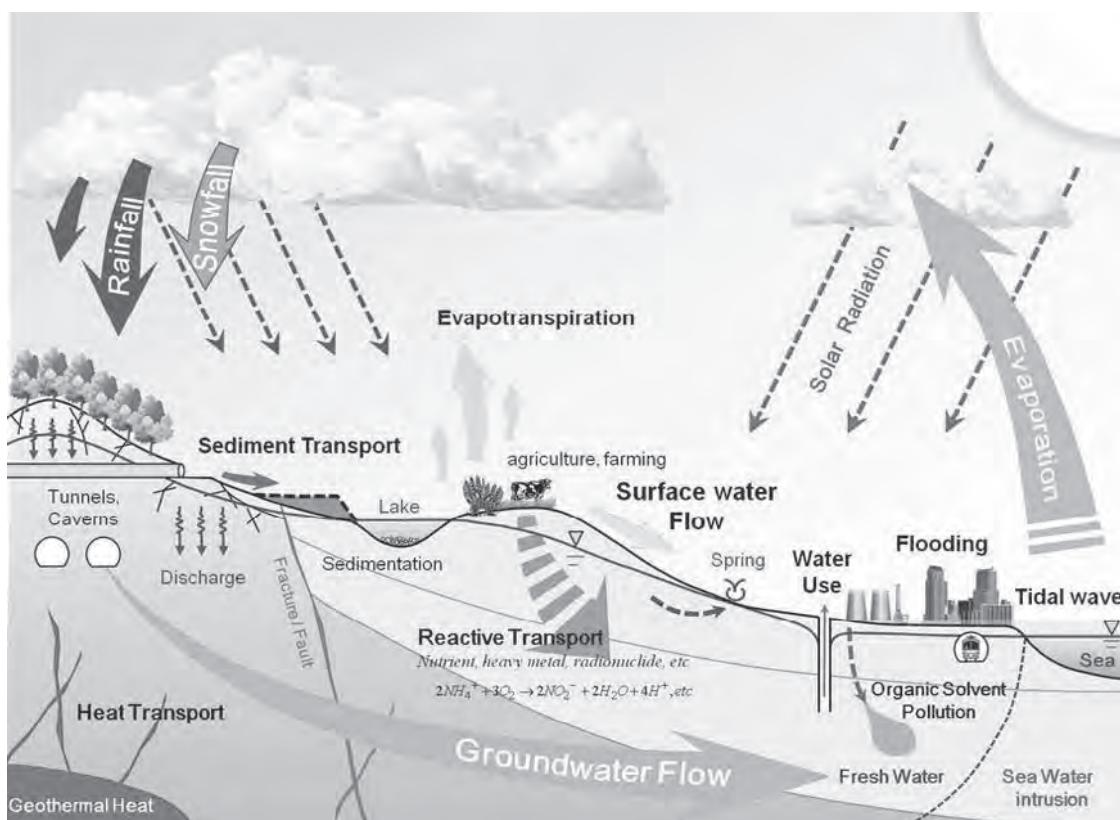


図 1-1 統合型水循環解析モデルが対象とする水循環過程の概念

統合型水循環解析では、従来個別に扱われてきた地表水の流れと地下水の流れを、統一的な数学モデルの下で同時に扱うことが可能である。地表水・地下水が一つのモデルで表現されることにより、地表水・地下水が相互に与える影響を継時的に考慮することができる。統合型水循環解析によって、対象とする水循環系をより自然に捉えることを可能にしている。

1.3. 統合型水循環解析ソフトウェア GETFLOWS®

本検討の水循環シミュレーション解析には、統合型水循環解析ソフトウェア GETFLOWS® (General purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator) (Tosaka¹⁻¹⁾) を使用する。

GETFLOWS®は、陸域で生じる様々な水問題（水資源、水環境、水災害）に対して、実用的かつ客観的な水文・水理モデルを用いて解明する手段を提供することを目的として開発された。一般的な地下水解析、河川流出解析、洪水・はん濫解析、地表水・地下水の相互作用解析、汚染物質を含む移流分散解析、油層解析、熱解析など、極めて広範な分野を対象とした解析が可能である。

GETFLOWS®は、陸域における水循環システムを多相多成分流体系として定式化し、地表水と地下水を分断することなく、両者を完全に一体化した地表水・地下水連成解析（地表水・地下水の相互作用解析）を実現している。これにより、地上と地下の様々な相互作用をシミュレーションに取り込み、3次元シミュレーションにより統合化された水の動きを描き出すことができる（図 1-2）。

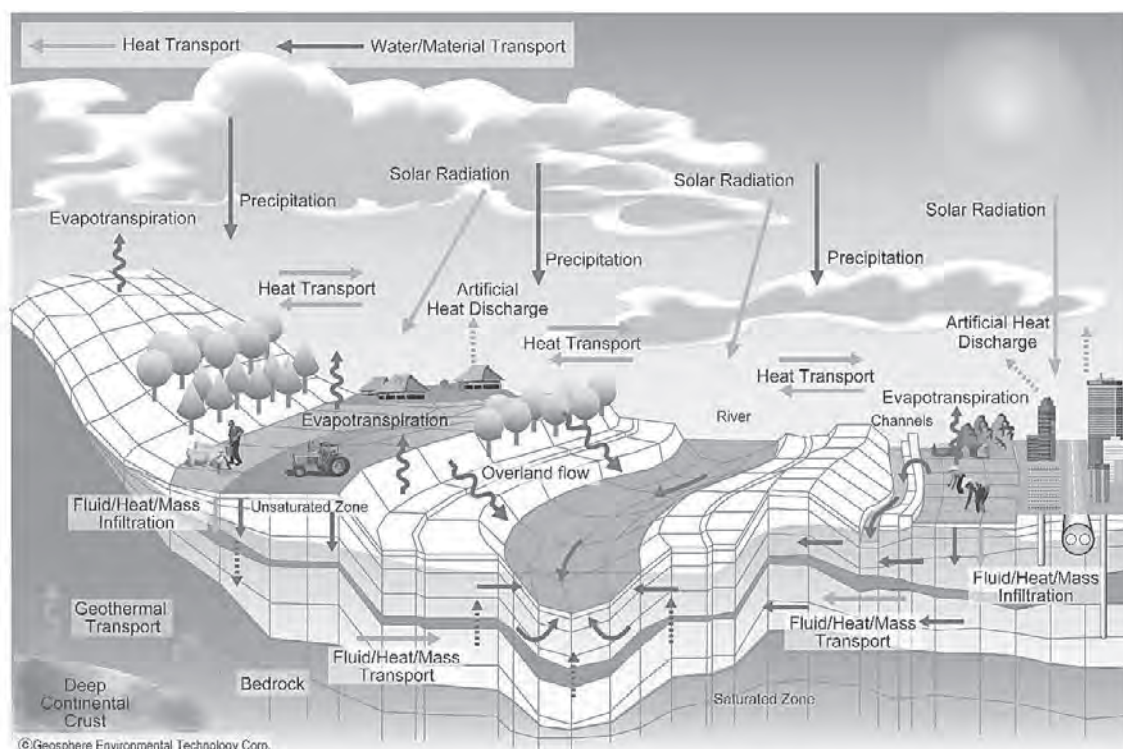


図 1-2 Conceptual Modeling for Simulating Water

統合型水循環解析モデルは、流域の地表・地下を三次元で分割し、地表水（拡散波近似）と地下水の流れ（多相流れ：水、空気、油など）を統一的な数学モデルの下で連成して解くものである。解析理論については後述する（1.5 節参照）。

統合型水循環シミュレータ GETFLOWS[®]は、以下のような特徴を有する。

- ・ 地形、地質、土地利用等条件を不定形の格子で忠実にモデル化できる。
- ・ 降雨、蒸発散量を入力条件として取り扱う。
- ・ 表流水、地下水間の伏没、湧出などの相互関係を解析する。
- ・ 地盤中は空気と水の 2 相系の流れとして取り扱う。
- ・ 地表付近の地盤不飽和特性を的確に表現することが可能である。
- ・ 解析範囲は、地形、地質等の条件を考慮して、水循環域全体を対象とできる。
- ・ 解析の目的に応じて任意に解析時間単位を設定可能である。
- ・ 気候変動による影響予測は、降雨、蒸発散、海水面などの条件設定により予測可能である。
- ・ 水質の変化は、海水などの密度流や地下水中の溶解物質の輸送を考慮することが可能である。
- ・ 土壌中の塩化物イオン濃度などの現況再現および将来予測を行うことができる。

1.4. 検討の流れ

本検討は、図 1-3 に示す手順に従って実施した。

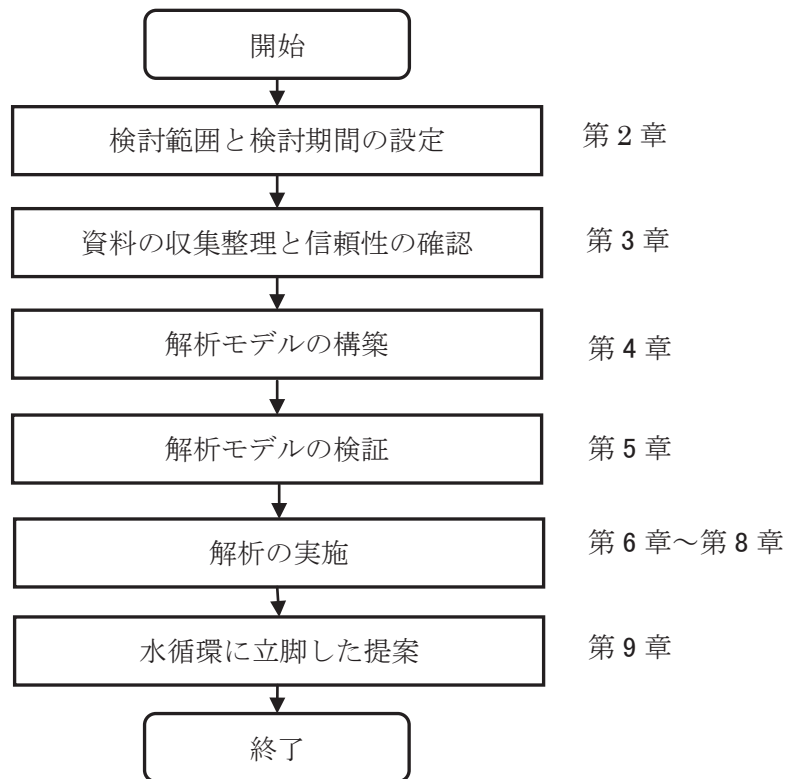


図 1-3 検討業務の流れ

1.5. 解析理論

等温状態における流れの支配方程式は以下に示す水相，空気相，水相中の溶存物質（塩）の質量収支式によって記述される。

$$\nabla \cdot (\rho_w v_w) + M_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_a v_a) + M_a = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \phi S_a) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho_w v_w C_s) + \nabla \cdot D_s \nabla (\rho_w C_s) + M_w C_s = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w C_s) \quad (3)$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

- ρ_p ; 流体相 $p(= w, a)$ の密度(kg/m^3)
- v_p ; 流体相 $p(= w, a)$ の流速(m/s)
- M_p ; 流体相 $p(= w, a)$ の生産・消滅量($kg/m^3/s$)
- ϕ ; 間隙率(-)
- S_p ; 流体相 $p(= w, a)$ の飽和率(-)
- C_s ; 溶存物質 s の濃度(kg/kg)
- D_s ; 溶存物質 s の水力学的分散係数(m^2/s)
- t ; 時間(s)
- w, a ; 相を識別するための記号（それぞれ水相，空気相）を示す
- s ; 溶存物質（塩）を識別するための記号を示す

流体相 p の流速 v_p は以下の式で評価する。後述する地表層格子における水平方向の水の流速に対してのみマニング則を仮定した開水路流れの浅水波近似式に拡散波近似を適用した(4)，(5)式を用い，その他にはダルシー則を仮定した(6)式を用いる。

$$v_{w,x} = -\frac{R_x^{\frac{2}{3}}}{n} \sqrt{\left| \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \cos^2 \theta_x \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \cos^2 \theta_x \right) \quad (4)$$

$$v_{w,y} = -\frac{R_y^{\frac{2}{3}}}{n} \sqrt{\left| \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial y} \cos^2 \theta_y \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial y} \cos^2 \theta_y \right) \quad (5)$$

$$v_p = -\frac{K_p k_{rp}}{\mu_p B_p} \nabla \Psi_p \quad (6)$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

v_w	; 水深で平均化した流動方向毎の流速(m/s)
R_x, R_y	; 流動方向 x, y 成分の径深(m)
n	; マニングの粗度係数($m^{-1/3}s$)
ξ	; 河床高(m)
h	; 水深(m)
θ_x, θ_y	; 流動方向 x, y 成分の斜面勾配(-)
x, y	; 流動方向 x, y 成分の距離(m)
K_p	; 流体相 $p(= w, a)$ の絶対浸透率(m^2)
k_{rp}	; 流体相 $p(= w, a)$ の相対浸透率(-)
μ_p	; 流体相 $p(= w, a)$ の粘性係数($Pa \cdot s$)
Ψ_p	; 流体相 $p(= w, a)$ の流体ポテンシャル(Pa)

空間離散化は、複雑な地形起伏や地盤物性分布を完全三次元格子により表現可能な積分型有限差分法 (Integral Finite Difference Method: IFDM) による。格子形状にはコーナーポイント型差分格子と呼ばれる多面体形状を用いることができ、それぞれの格子体積および隣接格子間の絶対浸透率を正確に評価する。

本手法は格子毎の厳密な質量収支を保存することができるため、油層工学などの多相流れを取り扱う分野に多くの適用実績をもつ。離散化手法に関してはヘルミック¹⁻²⁾に詳しい。さらに、任意領域の格子分割を局所的に細分化する LGR (Locally Grid-block Refinement) を適用することができる。現バージョンの GETFLOWS では、6 面体格子による構造格子系のみを取扱う。

強い非線形性を有する三次元流体問題を解く必要性から、時間離散化には方程式系の完全陰的有限差分展開を行ったものにニュートン・ラブソン法を適用し、各流体成分の方程式を反復的に解く手法を採用している。基本方程式を上記 IFDM によって空間離散化すると 7 重対角行列を係数行列とした連立方程式を得る。未知数は空気相圧力、水相飽和率、塩分濃度である。これを Nested Factorization (J. R. Appleyard¹⁻³⁾) と呼ばれる三次元構造格子の入れ子構造に着目した前処理を行い共役残差法で解く。上述した流体圧縮性や 2 相流パラメータの非線形性はニュートン・ラブソン法により繰り返し収斂させる。

また、大容量計算を高速処理するため、非線形反復過程の中で収斂した格子をソルバーから自動的に除外する逐次陽化処理 (Successive Locking Process) (Tosaka¹⁻⁴⁾) や領域分割法 (Domain Decomposition Method) による高速並列計算を採用し、実用規模の大規模三次元問題をより効率的に解く。

参考文献（第1章）

- 1-1) Hiroyuki TOSAKA, Koji MORI, Kazuhiro TADA, Yasuhiro TAWARA and Koji YAMASHITA, 2010. A General-purpose Terrestrial Fluids/Heat Flow Simulator for Watershed System Management, IAHR International Groundwater Symposium 2010.
- 1-2) ライナー・ヘルミック著, 平田健正, 樫山和男監訳, 小林健一郎訳, 2004. 地下環境での多相流と輸送現象 現象理解の基礎から数値解析まで, シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, pp.99-218.
- 1-3) J. R. Appleyard, I. M. Cheshire and R. K. Pollard, 1981. Special Techniques for Fully-Implicit Simulators, Enhanced oil recovery, pp.395-408.
- 1-4) Hiroyuki TOSAKA and Yukihiro MATSUMOTO, 1987. An Efficient Reservoir Simulation by The Successive Explicitization Process, Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol.52, No.4.

2. 検討対象範囲と検討対象期間の設定

2.1. 検討対象範囲の設定

ゴア州サル川流域の水循環解析の検討範囲を図 2-1 に示すように設定した。地形から判断されるサル川の流域およびその外回りの地域および周辺の海域を含んだモデルとしている。地下水の流動が、地表面の地形で設定された流域界とは異なる場合もあるため、地形から推定される流域界の外側を囲む範囲を検討対象範囲として設定した。

また、地下水が海底湧水として海底部から噴出する場合や、沿岸域における淡水と海水の相互作用（密度流）を考慮した流体挙動をシミュレートするため、陸域と海域の双方をモデル化するために必要な領域を設定した。（対象範囲の陸域面積は約 530km²）

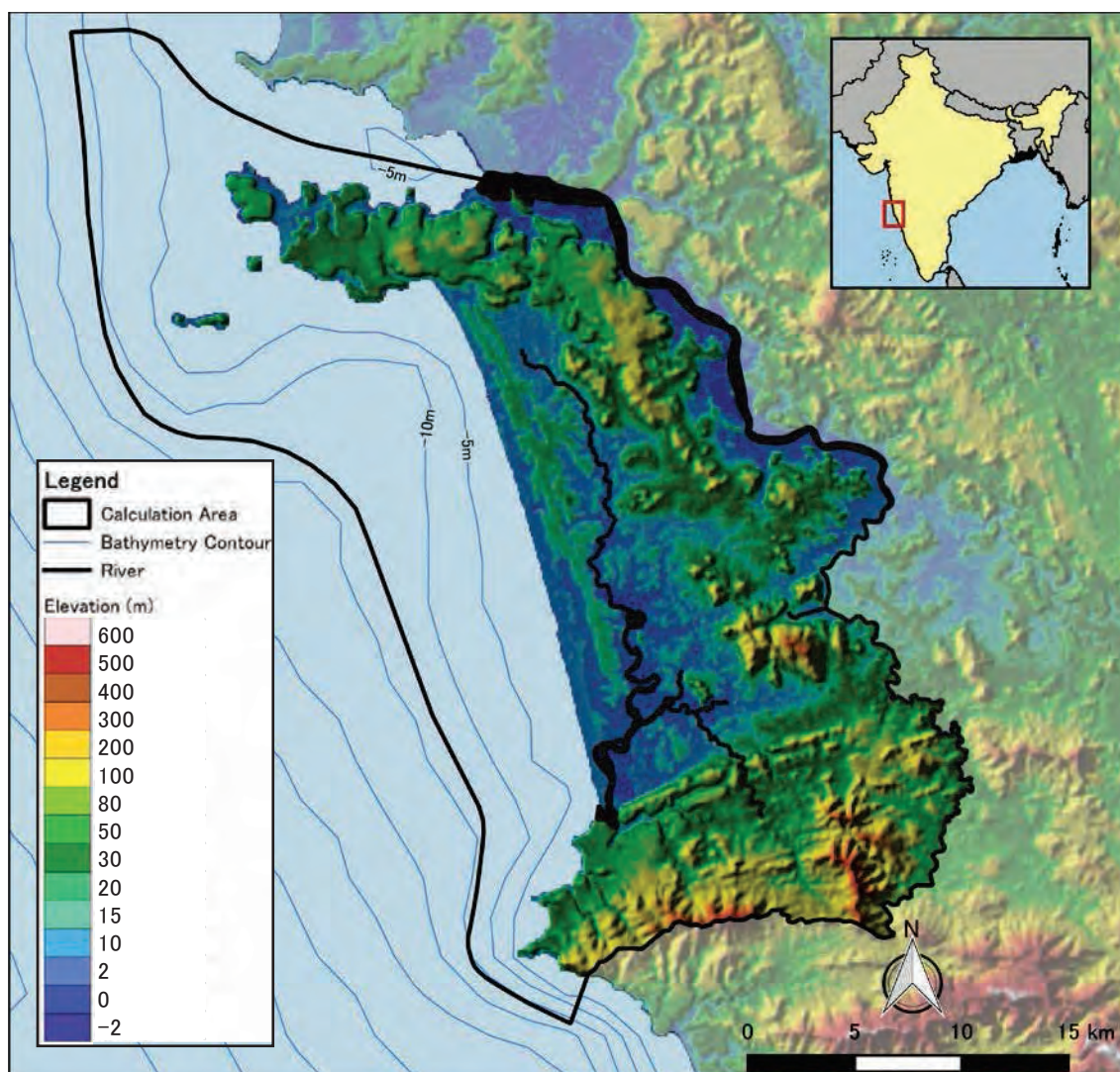


図 2-1 検討領域

2.2. 検討対象期間の設定

本解析業務の検討目的であるサル川流域の水循環の状況を可視化するという視点から、収集した気象観測値から推定される平年値の状況を再現解析するという方針を採用した。

上記の検討方針に従い、気象データは平年値を設定するために十分な期間のデータを収集することとした。

また、公表されている気象データから季節変動を解析に取り込む情報として、モンスーン季および非モンスーン季が区別できるように、気象や水文データの観測頻度は月単位の観測値を収集することを原則とした。

(平均値：32年間の気象データを統計期間とした平均値)

3. 資料収集・整理

水循環モデルは、地形、地質、土地利用、気象、水文、水利用等のデータを用いて解析する。解析モデルの構築、モデルへの入力、解析結果の検証のデータとして利用するために、関連する資料を収集・整理した。

資料収集にあたり、公開資料はできる限り収集することを基本とした。一般に公開されている資料としては、観測データの公開資料、文献資料に掲載された資料などがある。

3.1. 収集資料の使用目的

収集データは、水循環解析モデル構築に用いるパラメータ、入力データ、モデル検証データを設定するためのデータとして用いた。各データの使用目的は、次のように分類される。

- ✓ モデル構築：地形（陸域、海域）、地質（地質構造）、土地利用
- ✓ 入力データ：気象、地質（透水係数、有効間隙率）、水利用
- ✓ モデル検証：水文

3.2. 収集資料の信頼性確保

資料の収集・整理は、(1)資料・データの収集、(2)資料・データの整理、(3)資料・データの信頼性確認の手順に従って実施した。資料収集・整理にあたり、モデル構築に必要な資料の収集漏れを防止し、個別データを確認して必要な場合は補完し、入手したデータの信頼性を確認することに留意した。収集・整理した資料の中で、解析に用いるデータとして信頼性が欠如していると判断されたデータは不採用とした。

3.3. 気象

ゴア州は熱帯モンスーン気候帯に位置している。年間を通じての降水傾向は、モンスーン季と非モンスーン季に区分され、モンスーン期（6月～9月）に集中的な降雨が観測される。

気象データとして収集する項目は、降水量、気温、日照時間、風速、相対湿度である。収集・整理された気象データは、水循環モデルへの入力データとして使用した。収集データは検討対象範囲内に限定せず、検討範囲周辺の地域も含めて収集し、各データの信頼性もあわせて確認した。

3.3.1. 降水量

検討対象範囲周辺の気象観測データとして、気象庁 ClimatView では、ゴアの観測点（緯度: 15.48 ° N / 経度: 73.82° E 高度: 58m）およびベルガウムの観測点（緯度: 15.85 ° N / 経度: 74.62° E 高度: 747m）の月単位の降水量（1986年6月以降）を公開している。検討対象範囲の地形・地理条件を考慮して、ゴアの降水量データを採用することとした。

3.3.2. 気温

降水量データと同様に、気象庁 ClimatView³⁻¹⁾で公開されているゴアの気温データを採用することとした。

3.4. 地形

地形データは、既存の地図や数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) データを使用して構築される。本検討では、陸域および海域の標高に関するデータを収集・整理した。

地形データは、既存の地図および GIS データとして公開されており、これらを収集してモデルを構築した (図 3-1)。ゴア州をカバーしている地形標高データとして収集できた公開データは、リモート・センシング・データに限られた。それらの中から、具体的には、陸域地形 (標高) は NASA が提供している SRTM-3 (解像度 3-arc-second)、海域は NOAA が提供している ETOPO1 (解像度 1-arc-minute) を使用した。

また、サル川河床の縦断勾配は、河川流況に大きな影響を与える重要なデータであるので、別途収集することとしたが、詳細なデータが収集できなかったため、現地踏査結果に基づいて河床標高を推定した (図 3-2)。

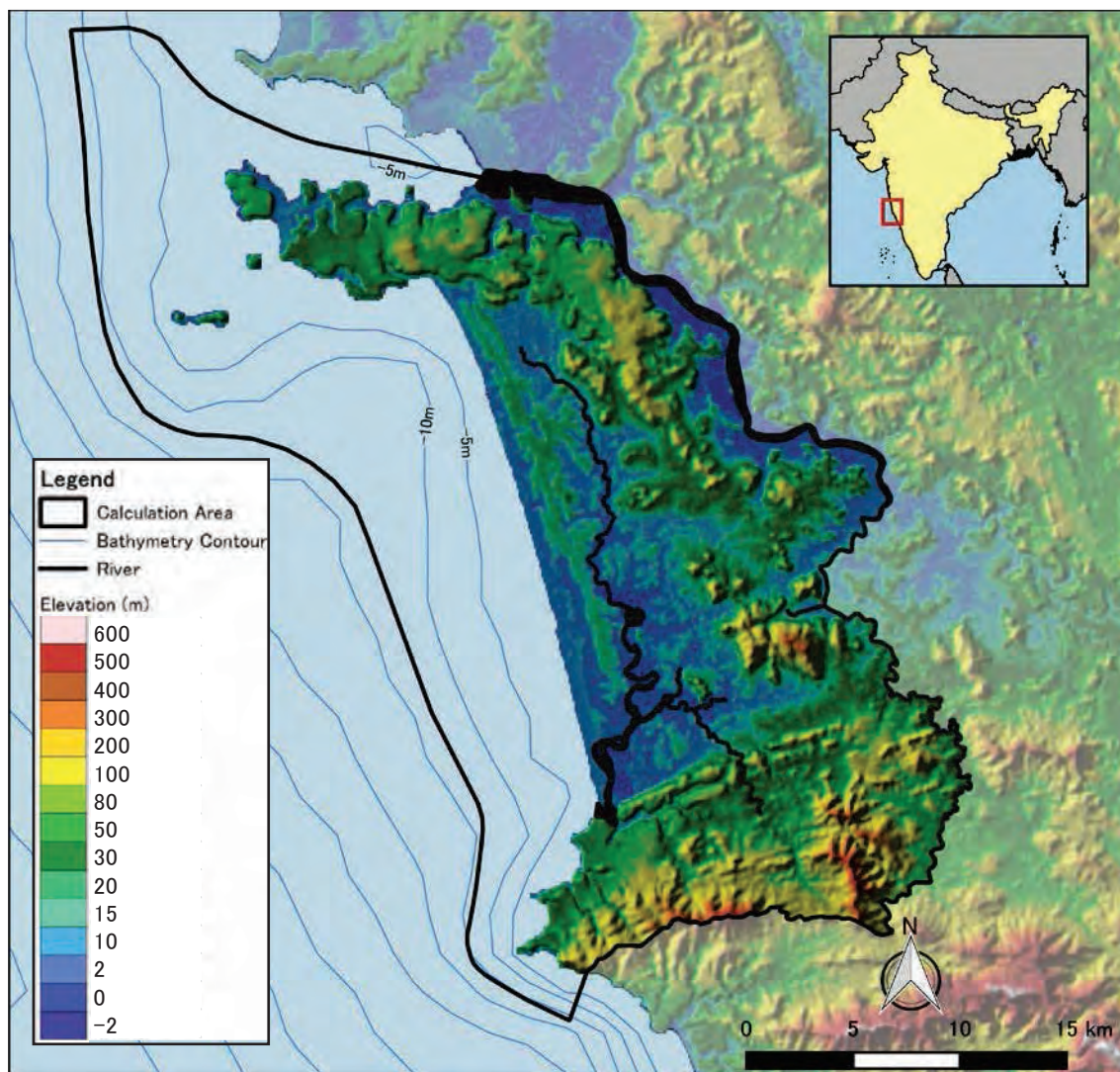


図 3-1 地形 (陸域 SRTM, 海域 ETOPO1)

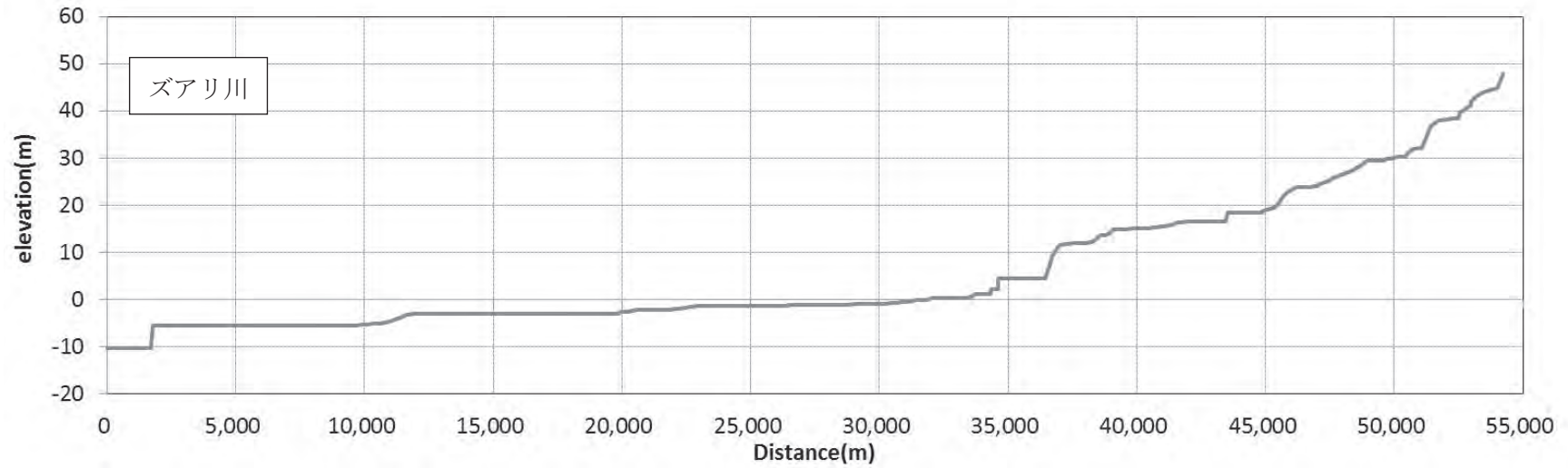
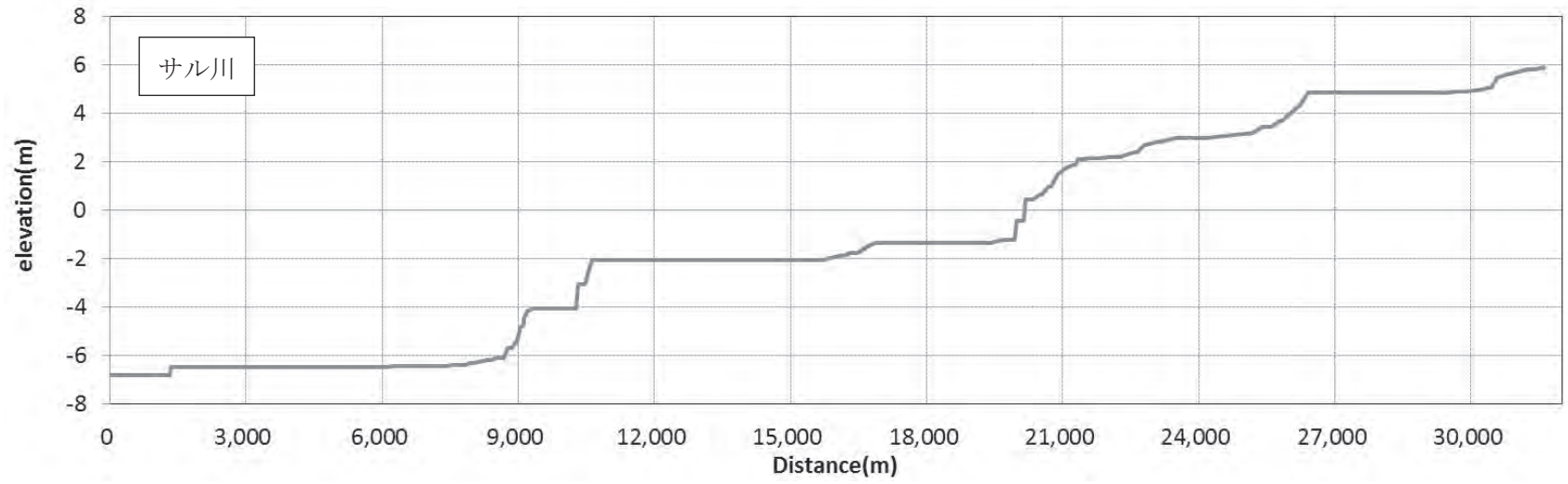


図 3-2 河床標高

3.5. 土地利用・植生

土地利用データは、全球土地被覆図 (The Global Land Cover by National Mapping Organizations : GLCNMO) を使用した。地球地図国際運営委員会 (International Steering Committee for Global Mapping : ISCGM) のホームページ³⁻²⁾ に GLCNMO について以下のように説明されている。

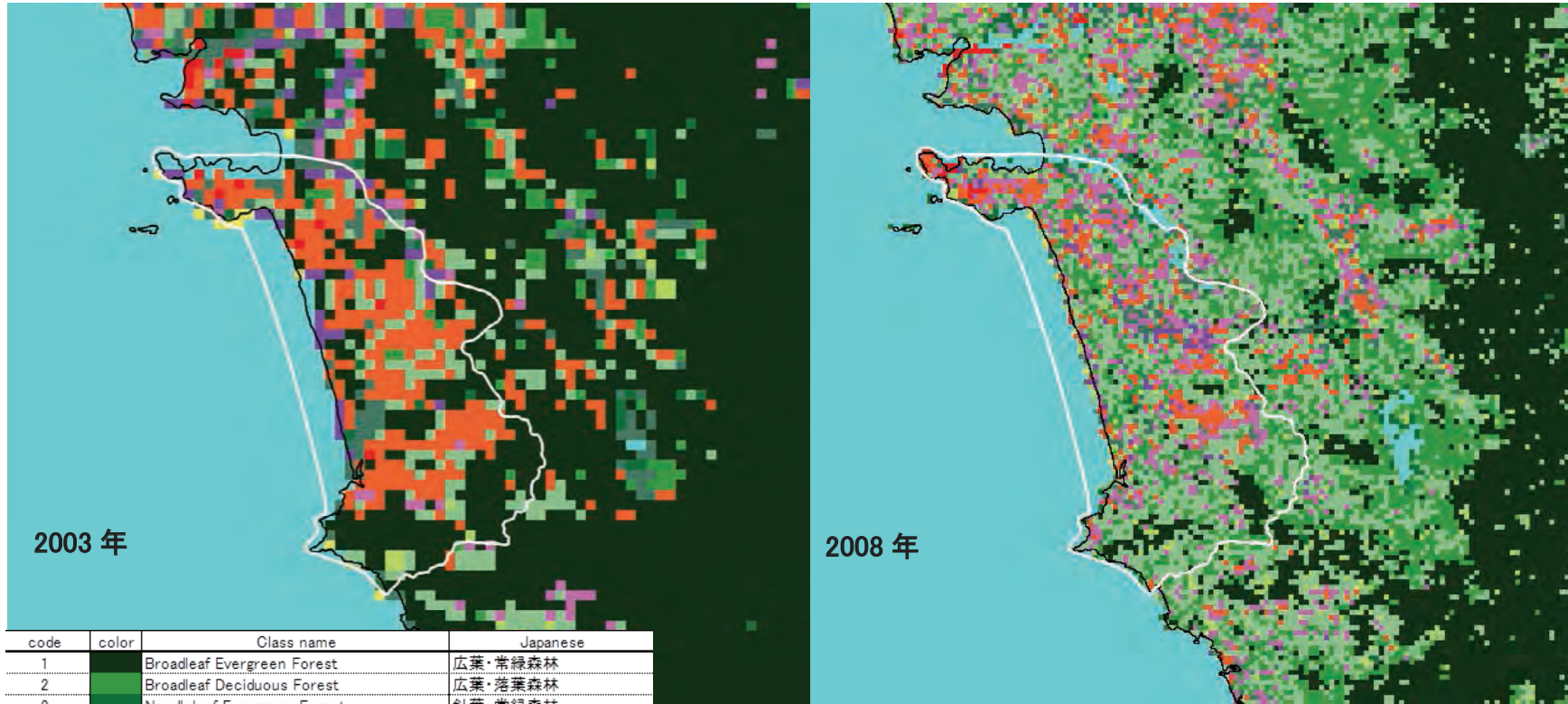
全球土地被覆図 (GLCNMO) は 20 のカテゴリーに全世界の土地被覆の状態を分類した、ラスタ形式の地理空間情報である。土地被覆 (GLCNMO) グローバルバージョンデータは、国土地理院 (GSI)、千葉大学、それぞれの国や地域の NGIAs と共同で ISCGM 事務局によって開発されてきた。データは、リモートセンシング技術と MODIS データを用いて調製された。データは 500m (15 秒) グリッドで全地球をカバーしている (Version2)。現在までに、2 つのデータ (Ver.1 と Ver.2) が開発・提供されている。

表 3-1 GLCNMO の 2 つのバージョンの比較

	Version 1	Version 2
Data source	MODIS data 2003 (Terra)	MODIS data 2008 (Terra & Aqua)
Coordinate system	WGS84	
Resolution	30 arcseconds	15 arcseconds

出典 : <http://www.iscgm.org/gm/glcnm.html>

図 3-3 に検討対象地域の GLCNMO による土地利用データを示した。GLCNMO の使用にあたり、国土地理院、千葉大学および関係機関 (Geospatial Information Authority of Japan, Chiba University and collaborating organizations) に謝意を表す。



code	color	Class name	Japanese
1	Dark Green	Broadleaf Evergreen Forest	広葉・常緑森林
2	Medium Green	Broadleaf Deciduous Forest	広葉・落葉森林
3	Light Green	Needleleaf Evergreen Forest	針葉・常緑森林
4	Dark Green	Needleleaf Deciduous Forest	針葉・落葉森林
5	Light Green	Mixed Forest	混合森林
6	Light Green	Tree Open	
7	Dark Green	Shrub	低木
8	Light Green	Herbaceous	草
9	Light Green	Herbaceous with Sparse Tree/Shrub	疎木・低木・草
10	Light Green	Sparse Vegetation	疎植生
11	Orange	Cropland	耕作地
12	Purple	Paddy Field	水田
13	Purple	Cropland / Other Vegetation Mosaic	耕作地 / その他の植生
14	Purple	Mangrove	密林
15	Light Blue	Wetland	湿地帯
16	Grey	Bare Area, Consolidated (Gravel, Rock)	裸地 (固結: 礫・岩盤)
17	Grey	Bare Area, Unconsolidated (Sand)	裸地 (未固結: 砂)
18	Red	Urban	都市部
19	White	Snow / Ice	雪・氷
20	Light Blue	Water Bodies	水域

図 3-3 土地利用 (GLCNMO Global Land Cover by National Mapping Organizations)

3.6. 水利用

人為的な水利用として、FAO のレポート(FAO Aquastat Water Report 37 , 2011 ³⁻³⁾)から農業利用に着目した水利用に関する資料を収集した。

表 3-2 インド全体の水利用データ ³⁻²⁾

Water: sources and use			
Renewable freshwater resources			
Precipitation (long-term average)	-	1 170	mm/yr
	-	3 846 000	million m ³ /yr
Internal renewable water resources (long-term average)	-	1 446 000	million m ³ /yr
Total actual renewable water resources	-	1 911 000	million m ³ /yr
Dependency ratio	-	31	%
Total actual renewable water resources per inhabitant	2009	1 582	m ³ /yr
Total dam capacity	2005	224 000	million m ³
Water withdrawal			
Total water withdrawal	2010	761 000	million m ³ /yr
- irrigation + livestock	2010	688 000	million m ³ /yr
- municipalities	2010	56 000	million m ³ /yr
- industry	2010	17 000	million m ³ /yr
• per inhabitant	2010	630	m ³ /yr
Surface water and groundwater withdrawal	2010	761 000	million m ³ /yr
• as % of total actual renewable water resources	2010	40	%
Non-conventional sources of water			
Produced wastewater	1996	25 410	million m ³ /yr
Treated wastewater		-	million m ³ /yr
Reused treated wastewater		-	million m ³ /yr
Desalinated water produced	1996	0.55	million m ³ /yr
Reused agricultural drainage water	2010	113 470	million m ³ /yr

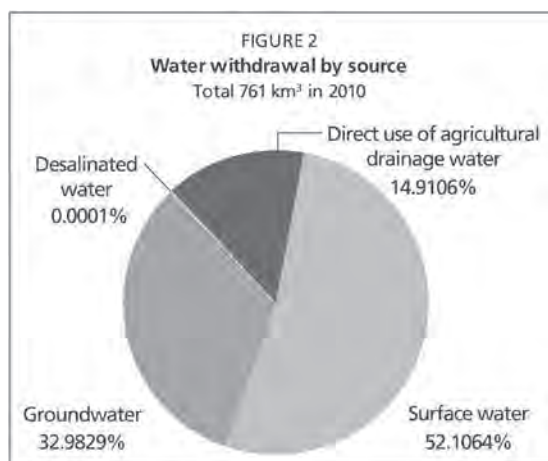
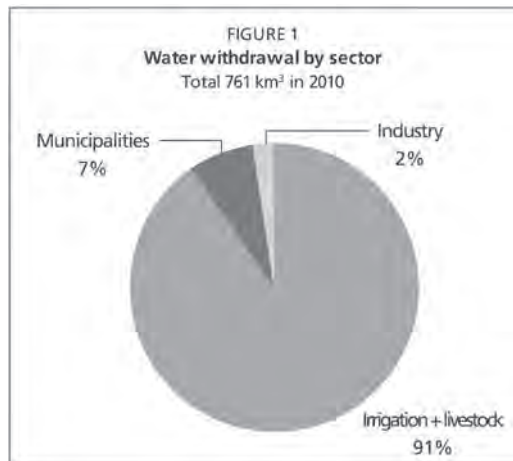


図 3-4 インドの水利用の割合 ³⁻¹⁷⁾

3.7. 土壌・地質

Manoj M. Ibrampurkar³⁻⁴⁾ が整理した南ゴアの地質図およびリニアメントをそれぞれ図 3-5 および図 3-6 に示す。

流域に分布する地質は花崗岩、片麻岩、塩基性変成岩、片岩で、表層部はラテライト化している。サル川の河口付近は沖積層の地層が分布する。

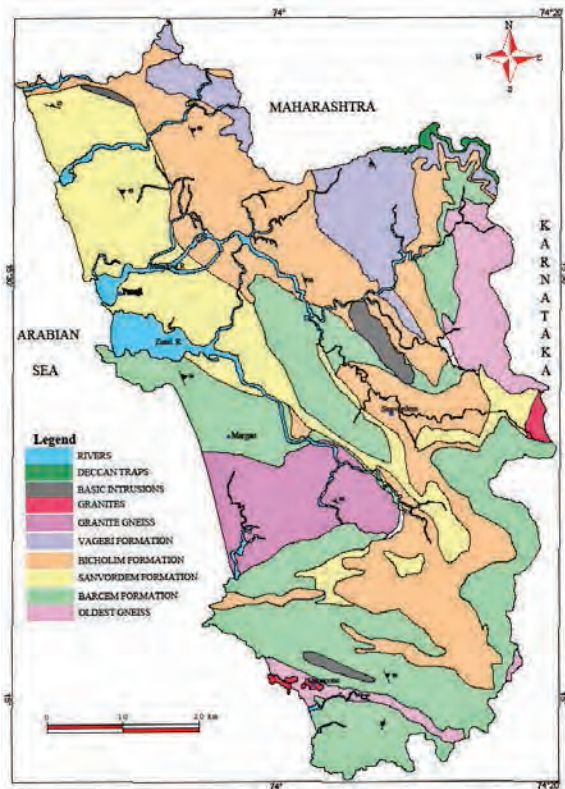


Figure 1.10 Geological map of Goa (modified after GSI, 1996)

図 3-5 地質図 3-3)

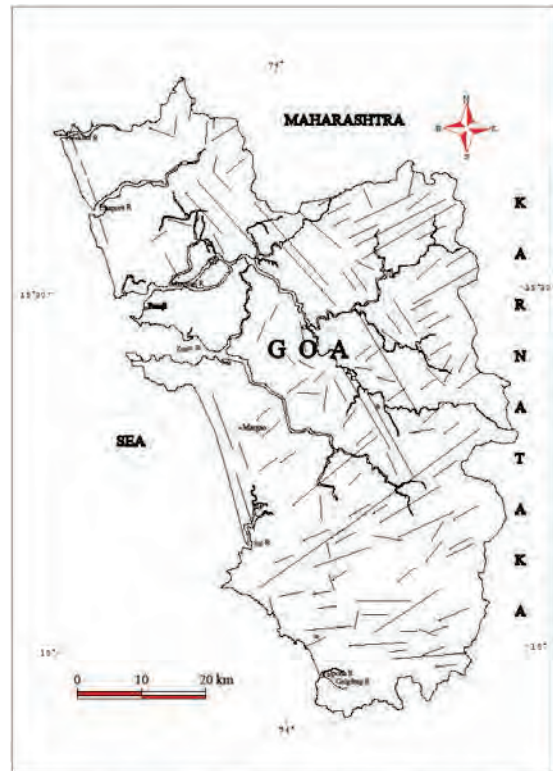


Figure 1.12 Lineament map of Goa (adopted and modified after Dessai and Peshwa, 1978 and Kunte, 1990)

図 3-6 リニアメント 3-3)

3.8. 水文

3.8.1. 水質

、Joe Dsouz³⁻⁵⁾は、Colva village 周辺の地下水は既に大腸菌群で汚染されているとして、次のように記載している。

サル川流域のいくつかの観測点における水質計測結果を図 3-7 に示す。金属含有量は少なくともモンスーン季においては特定の傾向を示していない。最近では、サル川の河川流路全体が継続的に急速な都市化、工業化、汚水廃棄物の脅威にさらされている。

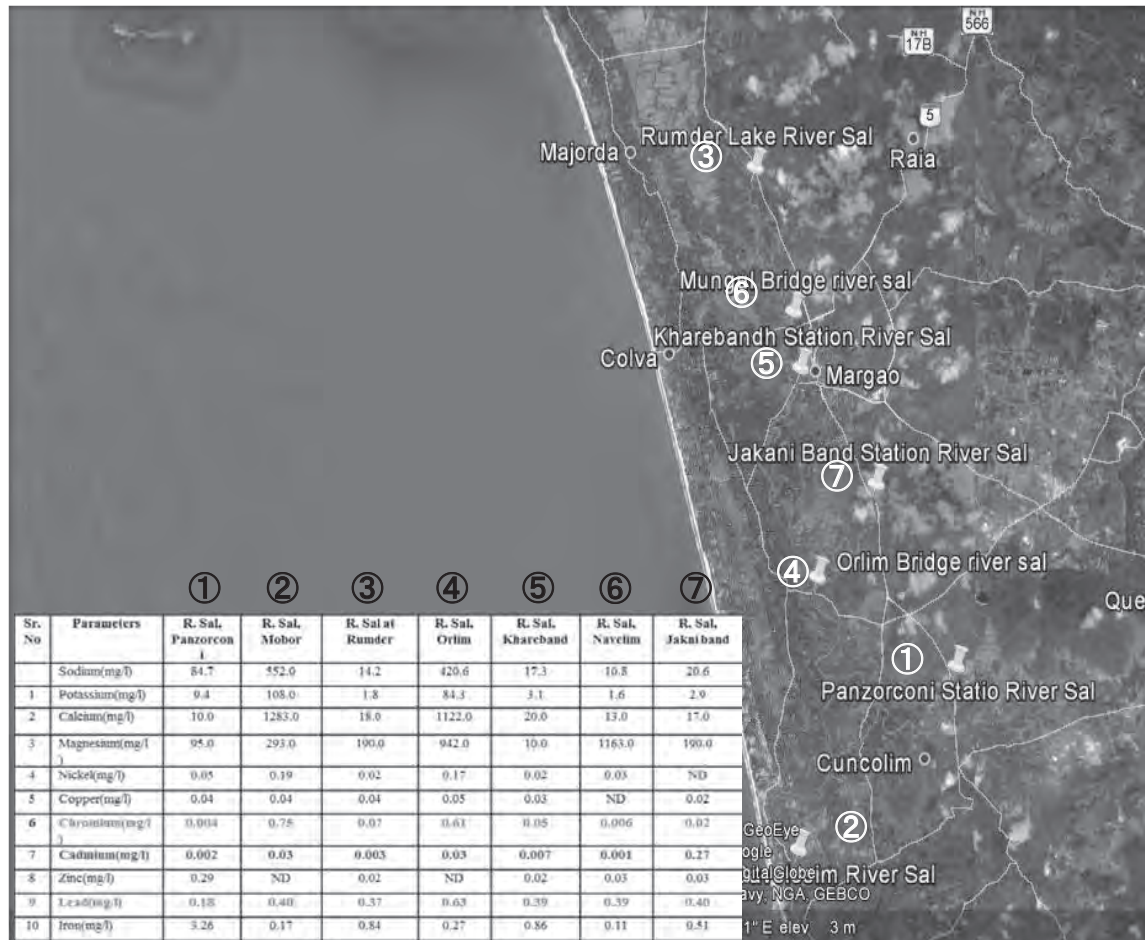


図 3-7 サル川河川水質³⁻¹³⁾

3.8.2. 地下水位

地下水情報小冊子ゴア 2013 年版³⁻⁶⁾にはモンスーン前（2011 年 5 月）とモンスーン後（2011 年 11 月）の地下水位分布が示されている（図 3-8）。モンスーン前には地下水位が 5～10m の地域が広く分布しているが、モンスーン後には流域全域に 5m 未満の地域が拡大している。

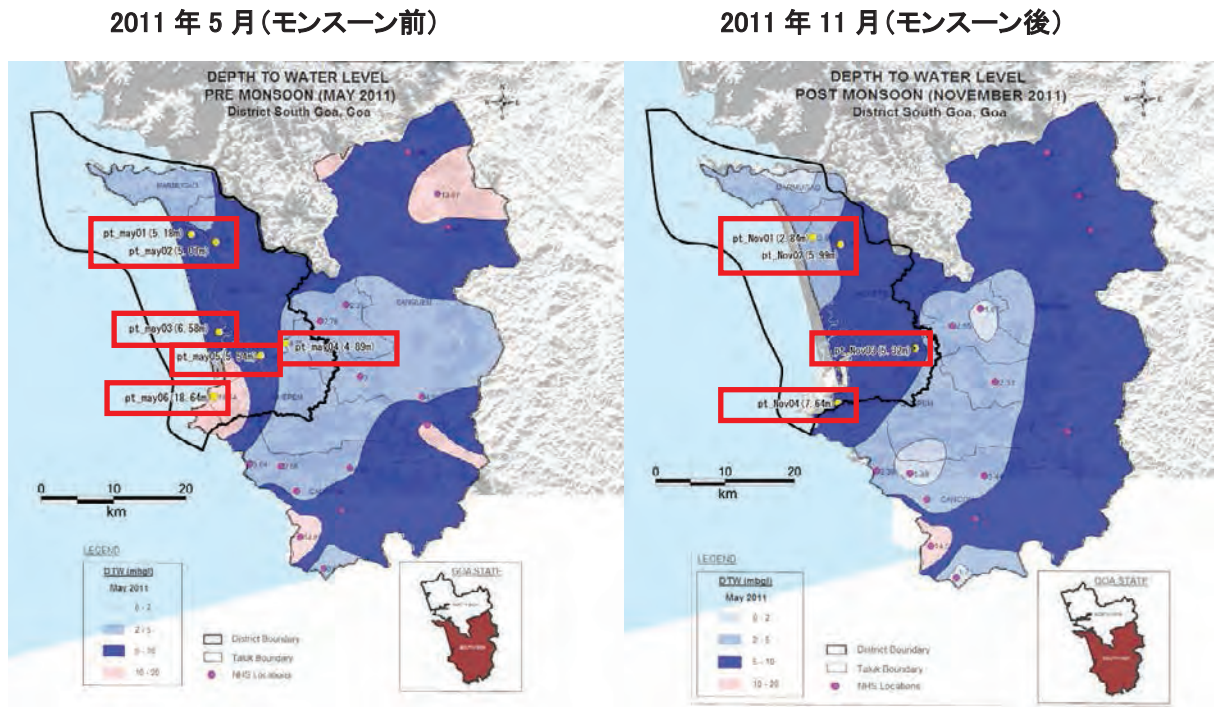


図 3-8 モンスーン前後の地下水位（2011 年）³⁻¹²⁾

参考文献（第 3 章）

- 3-1) 気象庁（世界の天候データツール：climatview）
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>
- 3-2) International Steering Committee for Global Mapping (ISCGM), GLCNMO
<http://www.iscgm.org/gm/glcnm.html>
- 3-3) FAO Aquastat Water Report 37, Irrigation in Southern and Eastern Asia in figures, 2011
- 3-4) Manoj M. Ibrampurkar, 2012, Hydrological and Hydrogeological Evaluation of Mhadei River Watershed - In Goa and Karnataka,
- 3-5) Joe Dsouza, Hydrological Implications of Land Use Change in Colva Village Area
- 3-6) Government of India, Ministry of Water Resources, Central Ground Water Board, 2013, Groundwater Information Booklet, South GOA District, Goa State

4. 解析モデルの構築

水循環解析モデルの構築は、まず、地形と地質構造を考慮して平面格子モデルを作成し、次に地下の地質構造モデルを勘案して3次元水理地質構造モデルを構築した。

地表層（陸面）の各格子には、気象、土地利用、蒸発散量の外力条件や設定パラメータを与えた。また、地表面下の各格子には、それぞれ地質条件に応じた透水係数と有効間隙比を初期パラメータとして与えた。この透水係数と有効間隙比は、計算結果の同定・検証作業により、最適な値となるまで試行錯誤による繰り返し計算を行い、最終同定値を決定した。

4.1. 格子作成の考え方

格子システムは大別して役割の異なる3つの層（大気層、地表層、地下地盤層）から構成される（図4-1）。各層の詳細を以下に示す。

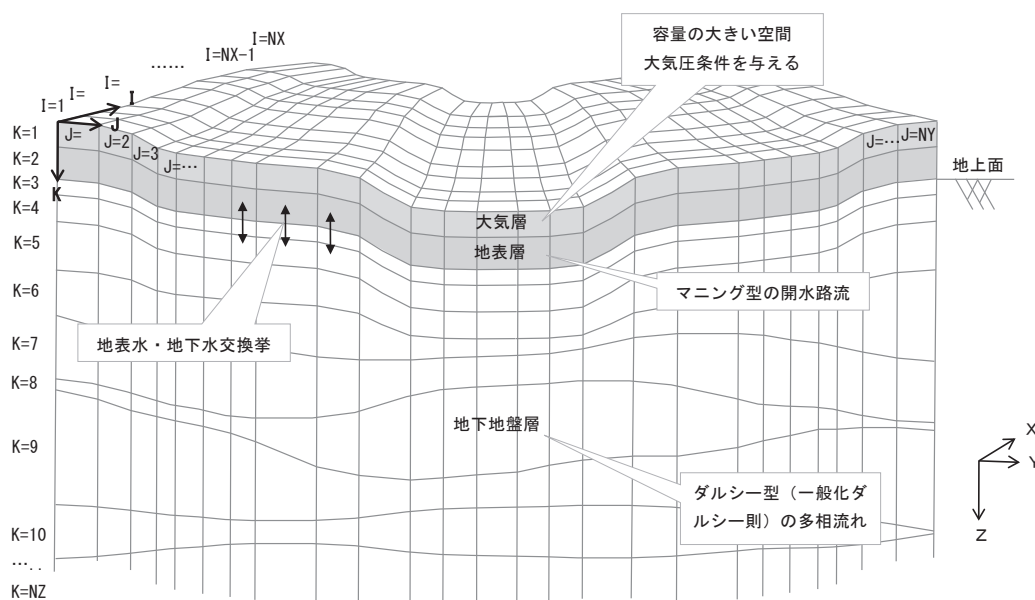


図 4-1 三次元格子モデルの概念

4.1.1. 大気格子

地上の大気層（接地境界層）は格子第一層（図4-1ではk=1の層）として表現される。

ここは、物理的には毛管圧力は0（自由空間）で、非常に大きな容量をもつ大気空間であることから間隙率は数値的無限大とし、浸透率（透水係数に相当）は非常に大きく、水飽和率は極めて小さな空間として設定する。大気層を構成する個々の格子には、通常、浸透率、間隙率に 10^{10} のような十分に大きな数値を与える。大気格子と地表面格子の境界では圧力勾配に従う空気流動を計算する。

4.1.2. 地表格子

地表層は格子第二層（図 4-1 では $k=2$ の層）として表現される。

地表層格子では、河川や斜面を流れる地表水、湖沼・海洋の貯留水を表現する。層流状態の空気相の流動も同時に考慮される。地表水の移動は地表格子層に沿う浅水流として扱い、質量保存式と拡散波近似を適用した運動量保存式により記述される。場所による地表水の移動し易さの相違は、土地利用や被覆状態に応じた等価粗度係数により考慮し、個々の格子に与えられる。また、地表層の間隙率は通常 1.0 であり、毛管圧力 0 であるが、地下浸透・湧出においては疑似毛管効果を計算し、浸透・湧出が整合的に表現される。

地表格子には、次のような陸面モデル条件および境界条件が設定される。

- ・ 気象外力（降水量・蒸発散量）
- ・ 土地利用分布（等価粗度係数）
- ・ 水利用・利水施設データ
- ・ 表流水境界条件（湖沼水位固定境界等）

4.1.3. 地下格子

地下地盤層は格子第三層以深（図 4-1 では $k=3$ 以深の層）として表現される。

地下地盤層を構成する格子は、一般化ダルシー則に従った多相多成分流体流動を表現する。個々の格子には、地層の水理物性（間隙率、浸透率、毛管曲線、相対浸透率曲線）を与え、流体圧力と飽和率、温度、濃度などが状態量（未知量）として解かれる。

地下格子には、次のような水理地質モデル条件、水利用条件および境界条件が設定される。

- ・ 地層水理物性（透水係数・有効間隙率・不飽和浸透特性）
- ・ 揚水井戸構造データ（取水深度等）
- ・ 地下水境界条件（不透壁境界、地下水位固定境界等）

4.2. モデルの空間解像度

陸域の平均的な平面解像度は約 150m である。また、深度方向の分割数は 18 分割とした。

4.3. 平面格子

GETFLOWS では可変格子が取り扱えるので（図 4-1 参照）、平面格子は検討対象のサル川の河道地形を考慮し、河道地形が表現できるように作成した。また、サル川流域の平坦部を細かく、東側の山地および海洋部など、領域の外周部を粗くして分割した。

検討対象地域の平面格子分割図を図 4-2 に示す。平面格子数は 22,128 である。

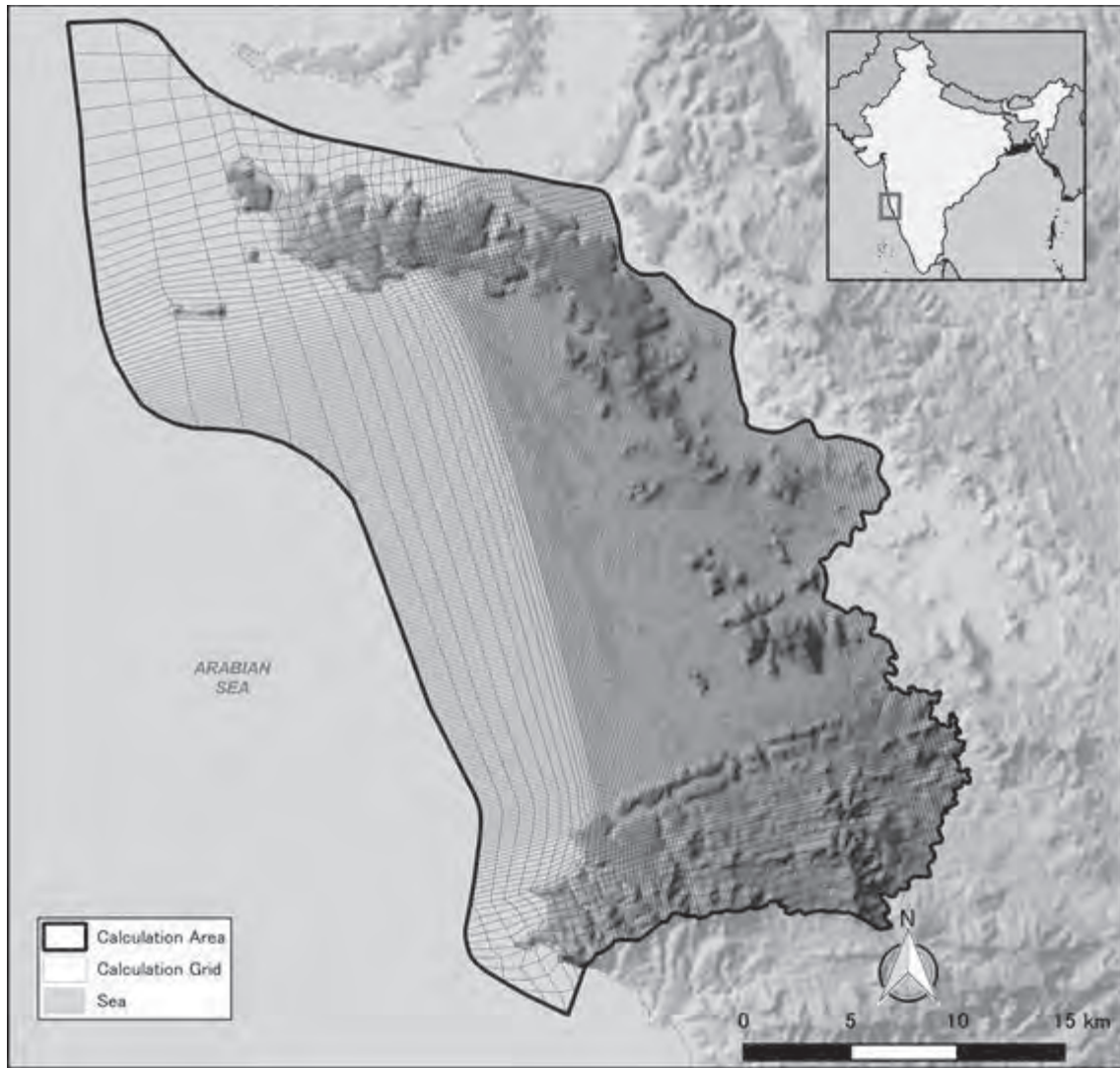


图 4-2 平面格子 (22, 128 格子)

4.4. 地質構造

4.4.1. 地形および分布地質

解析対象領域は、浸食の進んだ低平地で、低い丘陵が他の河川との流域境界を形成している。海岸沿いに砂丘があって、その後背低地を北から南にサル川が流れ、砂丘が途切れる南端に河口がある。

この地域には、Granite, Gneiss, Metabasalt, Schistなどの古期岩類が、基盤として広く分布している。基盤岩を覆って、海岸にはBeach Sand、サル川の下流部にはAlluviumが分布している。基盤岩類の地表部は風化して、Laterite 化している。Laterite は、丘陵の頂稜部で厚いとみられるが、厚さに関する詳細な情報は入手できなかった。地表は、海岸や河川敷を除き、表土に覆われている。

4.4.2. 水理地質

表 4-1 に本モデルで用いた地質層序を示す。また、モデルで採用した水理定数の設定値を表 4-2 に示す。

基盤岩類の新鮮部（Laterite 化部の下位）は、緻密で透水性は低いとみられる。新鮮部を流れる少量の水は、今回の解析の対象ではない。水理地質としては一括して、極めて低い透水係数と有効間隙率を設定した。

Alluvium はおもにサル川の河床下にあり、今回の解析の水理地質構造では無視した。サル川の横断形状が正確に測量されており、その流速を求める解析を行う場合は、考慮する必要がある。

Beach Sand は海岸に沿って砂丘を形成し、海底にも分布しているとみられるが、厚さに関する情報はない。砂丘地域の地下水と海水の陸域への侵入を再現するために、水理構造では十分厚く、その基底面コンターを設定した（図 4-3）。これがきわめて薄い場合は、地下水は限定されるが、一方、海水の陸域への侵入は抑制される。

Laterite および、基盤岩類の弱風化部については、その厚さに関する情報がないため 15m で一括し、中程度の透水性を設定した。仮に、解析領域の各所で地下水位の観測データが多くあれば、設定値の妥当性を検討することが可能となる。

地表に分布する表土層は、森林の根系が勧誘した範囲、もしくは、畑地などで耕作された範囲は、下位の Laterite より高い透水係数を設定し、ある程度の雨までは地下に浸透できるものとした。

表 4-1 地質層序

水理地質区分	記号色調	備考
海岸砂丘	SD	下面コンターあり
ラテライト等表層透水性部	LT	厚さ 15m一定
基盤岩新鮮部	BR	

表 4-2 水理定数設定値

水理地質区分	記号	透水係数 (m/s)	有効間隙率 (-)
表層土壌	S	1.0×10^{-4}	0.2
海岸砂丘	SD	1.0×10^{-4}	0.2
ラテライト等表層透水部	LT	1.0×10^{-6}	0.2
基盤岩新鮮部	BR	1.0×10^{-10}	0.001

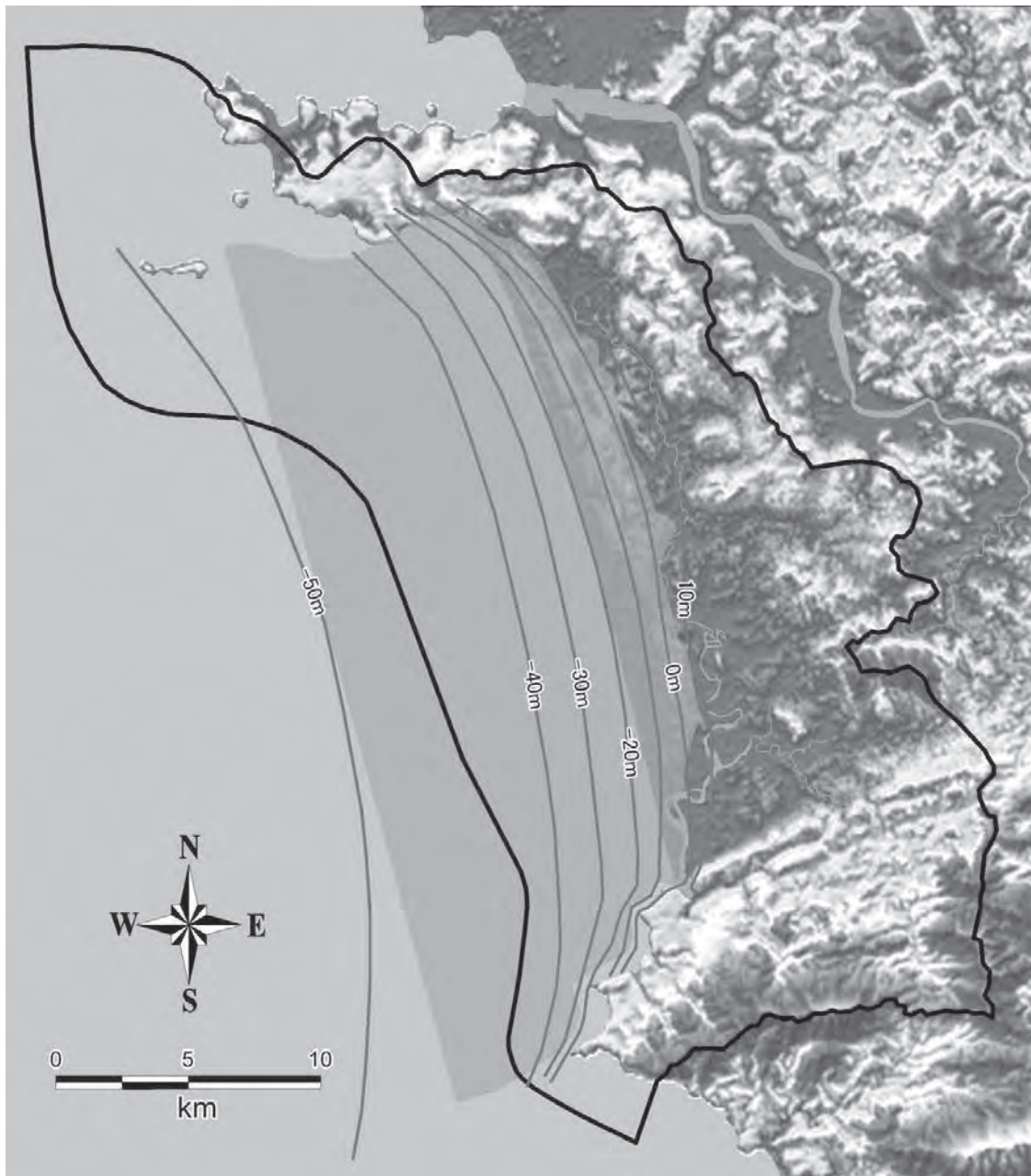


図 4-3 海岸砂丘下面コンター

4.5. 気象

気象条件は、降水量および気温とも領域内で一律とし、気象庁が ClimatView で公開している Goa のデータを採用した。これは、検討対象地域及びその周辺地域の気象観測データの収集を試みたが、信頼できる観測値が十分に得られなかったことに起因する。

また、モンスーン季および非モンスーン季が明確であり、本解析の目的が、季節変動に伴うサル川流域の水循環機構を明らかにすることであるため、気象データは月単位で与えることとした。具体的には、1982年（6月）～2014年（7月）のデータから平年値を算定した（図 4-4）。

気温は地点毎の標高補正を行っている。標高補正に使用する気温減率は、国際民間航空機関(ICA0)が定めた国際標準大気の気温通減率である -0.0065 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) を採用した。

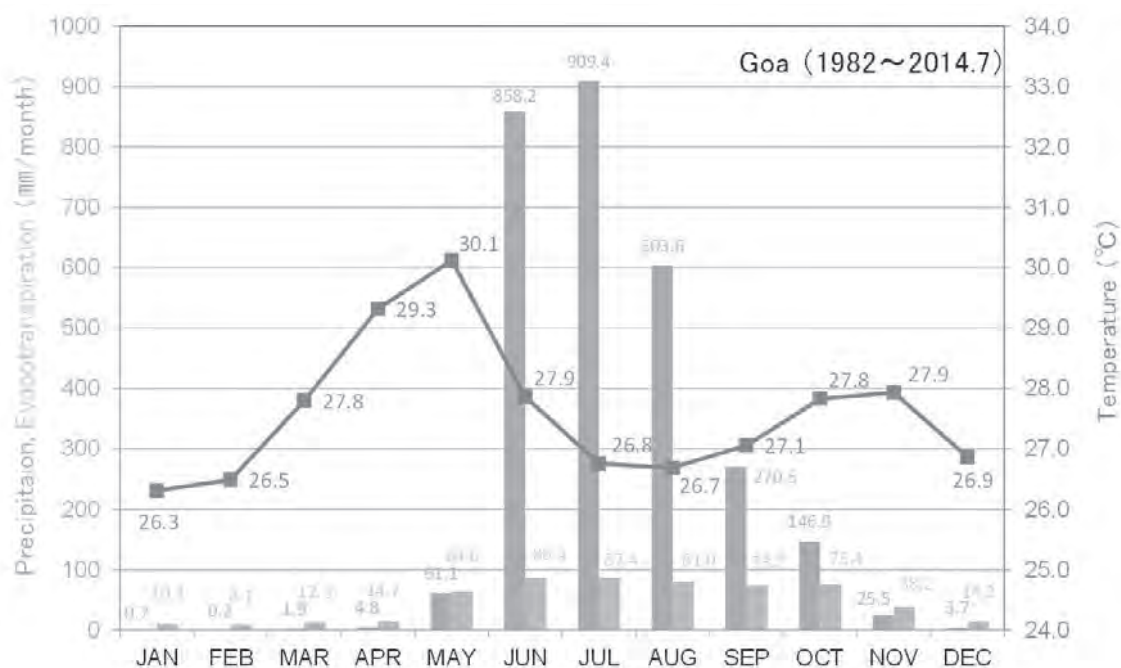


図 4-4 解析に使用した降水量・実蒸発散量および気温（領域内で一律）

蒸発散量はハーモン法により格子毎に算出した。ハーモン法は、経験法則から導かれた手法で、日平均気温と緯度に応じた可照時間から可能蒸発散量を推定するものである。ハーモン法による可能蒸発散量は次式を用いて算定される。

$$E_p = 0.14D_0^2 p_t$$

E_p : 日平均蒸発散量 (mm/d)

D_0 : 12 時間を 1 に規格化した可照時間 (—)

p_t : 飽和絶対湿度 (g/m^3)

飽和絶対湿度 p_i は理想気体を仮定し、次式によって算出する。

$$p_i = \frac{217 + e_{sat}}{T + 273.15}$$

e_{sat} : 飽和水蒸気圧(hPa)

T : 温度(°C)

ここで、気温 T は各地点の標高補正後の気温である。

4.6. 土地利用

本検討では、土地利用データは地表面の等価粗度の算定に使用される。

ISGS が提供する全球土地被覆図 (GLCNMO) のデータを、地表面の格子に割り当てた状況を図 4-5 に示す。また、それぞれの土地利用区分に応じた等価粗度係数の設定値を表 4-3 に示す。凡例は GLCNMO に準拠している。

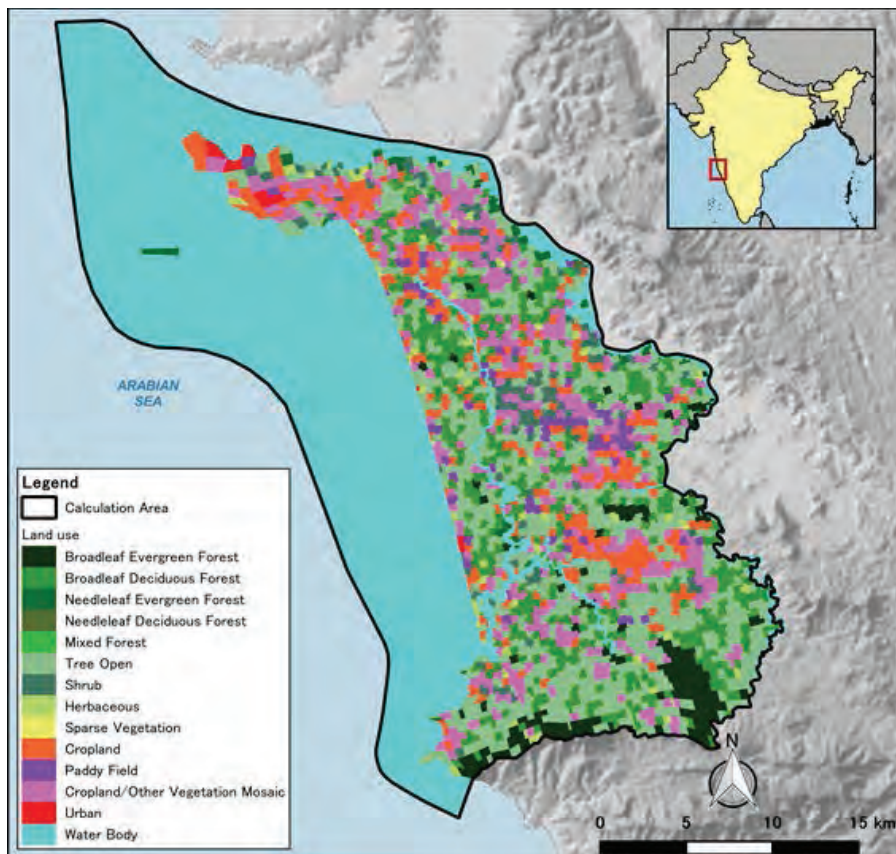


図 4-5 格子に割り当てた土地利用データ

表 4-3 等価粗度係数設定値

土地被覆の種別		設定値 単位：M ^{-1/3} ・s
Broadleaf Evergreen Forest	常緑広葉樹林	0.6
Broadleaf Deciduous Forest	落葉広葉樹林	0.6
Needleleaf Evergreen Forest	常緑針葉樹林	0.6
Needleleaf Deciduous Forest	落葉針葉樹林	0.6
Mixed Forest	混合樹林	0.6
Tree Open	疎林	0.3
Shrub	灌木	0.3
Herbaceous	草地	0.3
Sparse Vegetation	まばらな植生（草、灌木、木）	0.3
Herbaceous	耕作地	0.3
Paddy field	水田	2.0
Cropland / Other Vegetation	畑及びその他農用地	0.3
Bare area	裸地	0.3
Urban	市街地	0.05
Water bodies	水部（河川・水域・海）	0.035

4.7. 沿岸域における海水の影響

海岸線近傍の塩水侵入の影響を明らかにするため、沿岸域における淡水と海水の相互作用（密度流）を考慮した流体挙動を計算する。GETFLOWS®では、通常、陸域と海域の双方をモデル化し、海域には陸域地形と連続した海底地形を直接組み込んでいる。海水は塩分を含んだ地表水として表現し、海底の地下水と同時に解かれる。地表水、地下水を区別することなく、いずれも水相中に含まれる塩分量の相違によって、沿岸域に形成される淡塩漸移帯とその周囲に生じる密度流を解析できる。

塩分密度流解析に用いた設定値を表 4-4 に示す。

表 4-4 塩分密度流解析の設定値

項目	条件	単位
海水の塩分濃度	36.0	PSU (Practical Salinity Unit)
分子拡散係数	1.68×10^{-9}	m ² /s
分散長（縦、横）	縦：0.1 / 横：0.01	m

4.8. 三次元格子モデル

平面格子（図 4-2 参照）を深度方向に押し出し、地質分布状況を考慮して、3次元格子モデルを構築した。深度方向の分割についても、平面格子の場合と同様に、可変格子が取り扱えるので（図 4-1 参照）、想定される地質分布に合わせて格子を作成した。

構築された3次元水理地質モデルについて、地形（標高）に基づいた表示の鳥瞰図を図 4-6 に示す。サル川流域の北側上空から南に向かって検討対象範囲を鳥瞰した図である。

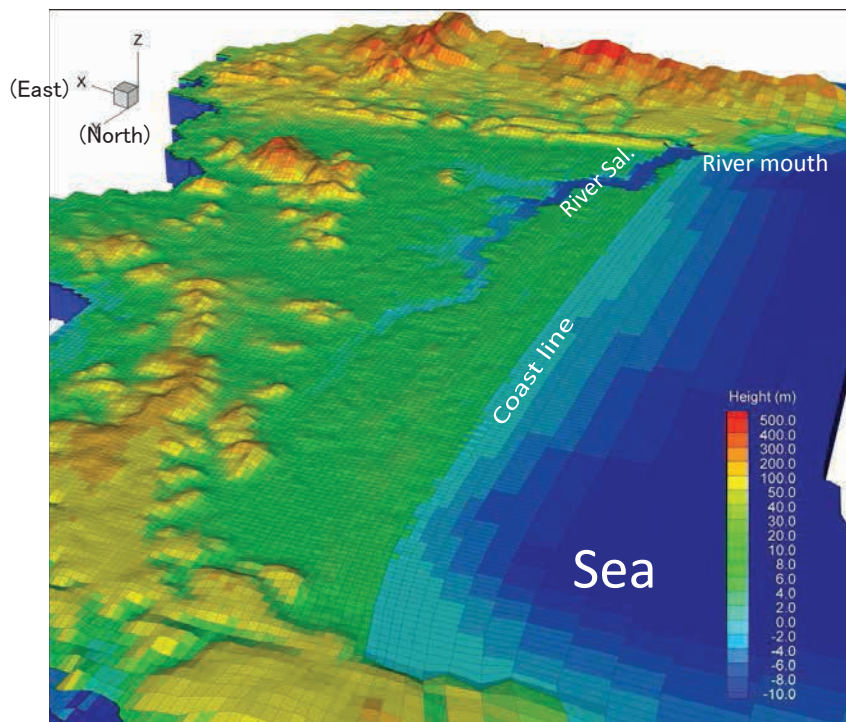


図 4-6 三次元モデル鳥瞰図（北側からの鳥瞰

5. 解析モデルの検証

5.1. 現況再現計算のフロー

水循環解析モデルは、設定した水理パラメータ（透水係数および有効間隙率）の妥当性検証を再現計算により行い、再現性を確認した上で再現性の優れた水理パラメータを同定することにより構築される。

ここで、一般的な水理パラメータの同定の手順は、

- ① 水理パラメータを設定する。
- ② 設定されたパラメータを用いて解析を実行する（試計算）。
- ③ 検証地点における計算値と観測値を比較・検証する（検証）。

という手順を繰り返して、最適なパラメータが同定される。

また、構築されたモデルの同定、検証は、

Step1 自然状態による定常解析

Step2 自然状態および人為的な水利用を考慮した状態による非定常解析

という Step を経てモデルの妥当性が検証される。

本検討では、解析モデルの同定・検証および現況再現の水循環解析は、

- 1) 自然状態の定常場（領域の平均的な自然状態を表す）を算定し、領域を初期化
- 2) 非定常応答解析により現況を再現（自然状態、人為的な水利用を考慮した状態）

の手順に従って実施した。

定常解析から非定常解析にわたる検証・同定のフローを図 5-1 に示す。また、解析の流れの概念を図 5-2 に示す。

自然状態の定常解析では、河川流量や地下水位等の既存観測データの平均値等と比較し、流域の平均的な状態の再現性を検証するとともに、地形モデルの不整合（格子モデルの水平解像度等の影響による河川勾配が逆勾配となる現象など）の修正などに用いられる。

自然状態における非定常解析では、長期的な観点で洪水期や渇水期での河川流量変動傾向の再現性を確認する。具体的には、入力データとしての気象の変動要素と検証に用いる河川流量や地下水位などのデータなどの応答関係からモデルの検証をする。

人為的な水利用を考慮した非定常解析では、灌漑期の水利用による河川流量や地下水位の変化等の再現性が向上するように、さらに水理パラメータを修正する。

人為的な水利用を考慮した水理パラメータが同定されると、現況の水循環が再現できる。また、同定した水理パラメータを用いて、過去再現、将来予測及び感度分析などが実行できる。

過去再現解析は、再現する過去時点の気象条件、地形、河道形状及び河床高、土地利用、水利用などを推定し、これらをモデルに組込んで解析することができる。

将来予測は、予測する将来時点の同様な項目を推定し、これらをモデルに組込んで解析することができる。

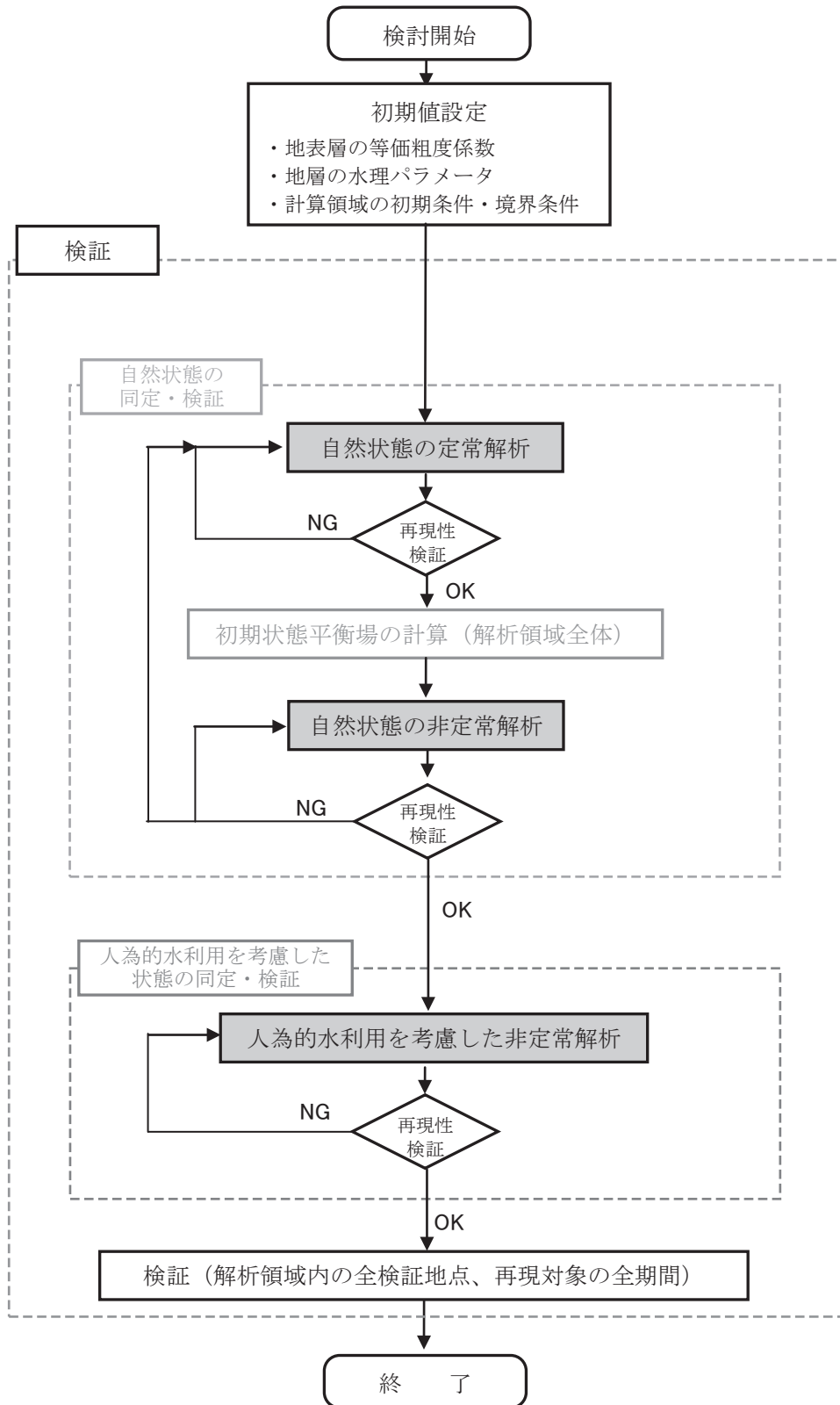


図 5-1 検証・同定のフロー

ここで、定常解析による領域の初期化について説明する。

地上に水が無く、水面が地形と同じである状態、すなわち地盤内が地下水で完全に飽和した状態から計算を開始する。

流域の平均降水量及び平均気温（蒸発散量が一定となる）を与え続け、地盤中を移動する水・空気 2 相流の定常解析を実施する。この時、地中の不飽和帯では、地下水面の低下とともに地上から空気を引き込み、水・空気相互置換が行われる。この間、低地では湧水が起り、河川が形成される。同時に標高の高い地点では地盤内に空気が侵入し、不飽和帯が発達する（地下水面が低下する）。

最終的には気象・地形・地質等の流域固有の条件とバランスする平衡状態に達し、地表水・地下水が完全にバランスされた地下水と河川の水流況が描き出される。すなわち、領域が初期化される。この領域の初期化により、地表層には河川、湖沼、湿地帯などが自然のあるがままの水循環の平衡状態の姿として形成される。

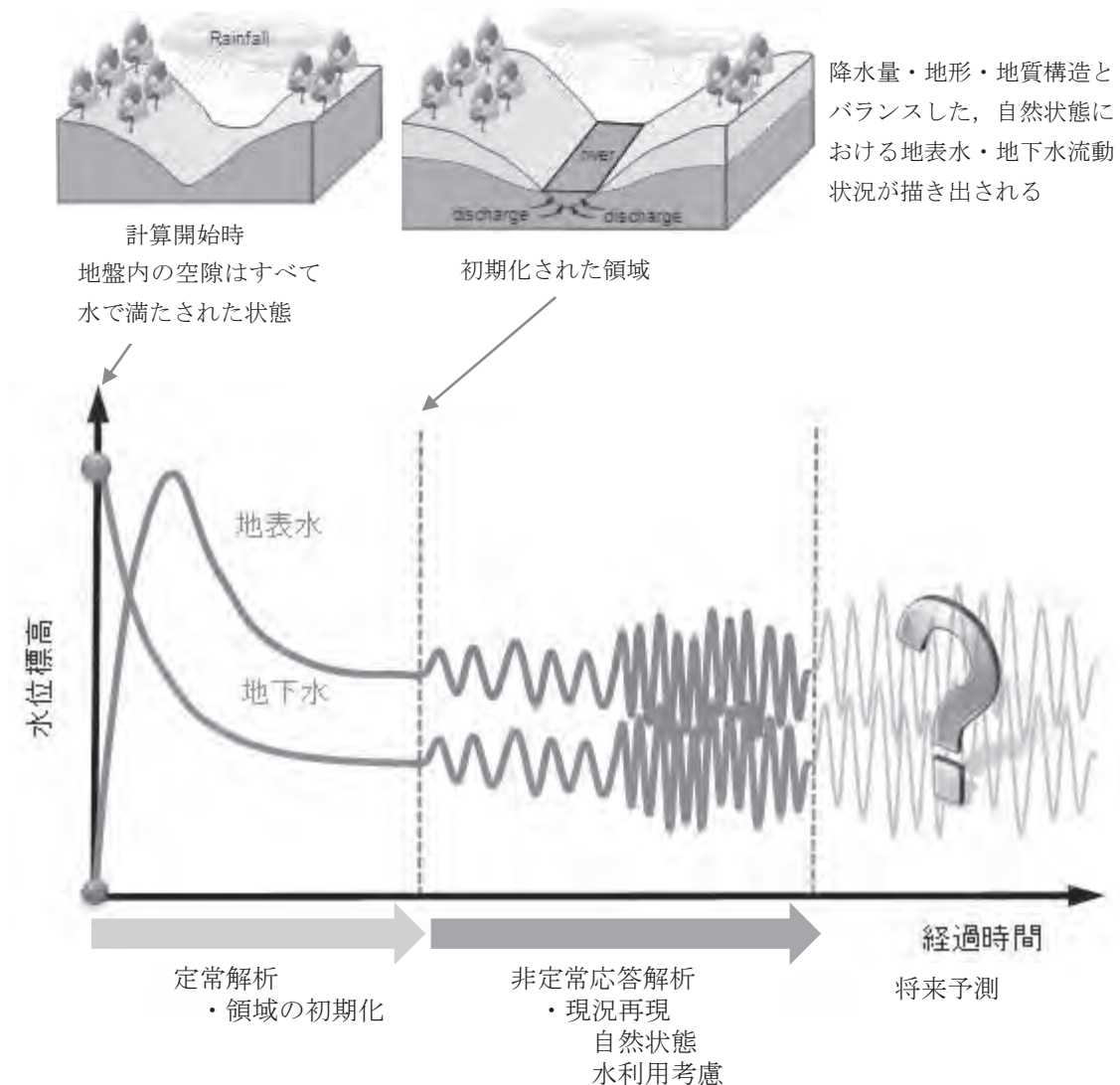


図 5-2 水循環解析モデルによる解析の流れ

5.2. 解析モデルの検証

定常解析による領域の初期化の後、非定常応答解析による現況再現を行った。現況再現計算では、気象条件を月単位で与え、日単位で計算を行った。

現況再現結果による解析モデルの検証は、現地観測で得られた地下水位のデータを用いて実施した。

2回に亘って実施した現地観測結果と解析結果を比較した（図 5-3、図 5-4）。

斜面上の観測地点では観測値と計算値との間に差が見られるが計算値と観測値との差が5m以内に収まっている。

したがって、計算結果は現況を再現していると判断できる。

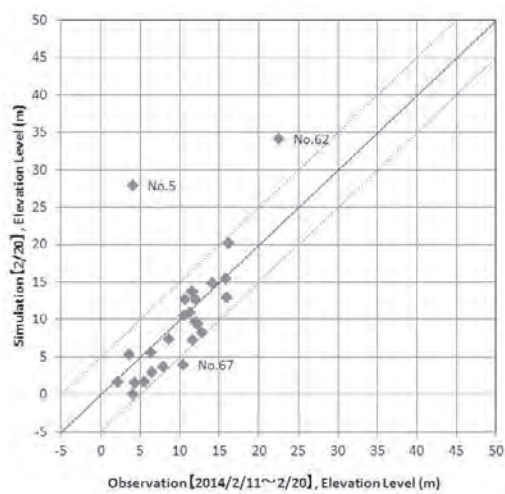


図 5-3 第1回現地観測地下水位と計算地下水位の比較【標高表示】
(2014/2/11 - 2/20)

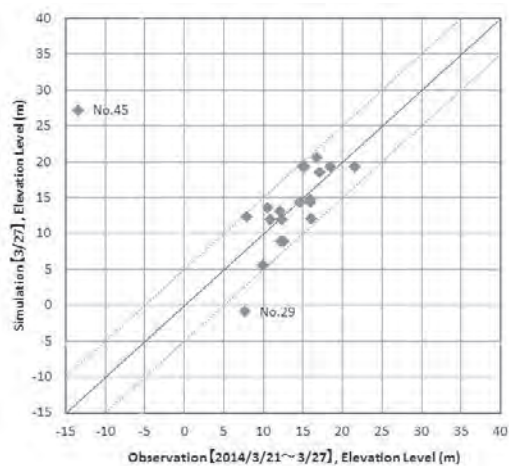


図 5-4 第2回現地観測地下水位と計算地下水位の比較【標高表示】
(2014/3/21 - 3/27)

6. 人為的な水利用を考慮しない自然状態の再現

検証により現況が概ね再現されていると確認された 3次元水循環解析モデルを用いて、サル川流域の人為的な水利用を考慮しない自然状態を、平均的な気象外力を用いた定常解析による平衡流動場を求めた後、日単位の非定常解析により再現した。ただし、4.5章で述べたように、気象データは月単位で与えているため、各月（1か月間）は同一の気象外力として入力した。

当該地域の典型的な気象環境として、モンスーン前（5月）、モンスーン季（7月）、モンスーン後（11月）を抽出した。以下では、この5月、7月、11月の各月について解析結果を示す。

6.1. 地表水の水深分布

検討対象地域全体の地表水の水深分布を図 6-1 に示す。

モンスーン前に浸水していない平地部分について、モンスーン期に集中した降雨の影響により、7月には丘陵部を除く広い範囲で10cm～50cm程度の水深を有する浸水状態にある。拡大図から、表示された地域の平地部がほぼ浸水状態であることが確認できる。ただし、陸域地形データ解像度が3-arc-second（約90m）であり、構築されたモデルの平面解像度が150mであるため、平坦部の微地形を正確に表現できていない部分もあると考えられ、そのため、浸水域が正確には表現できていない部分もあるものと思われる。より正確な浸水域を再現するためには、陸域の微地形をモデル化するに十分な精度を有する高解像度のDEMデータが必要となる。

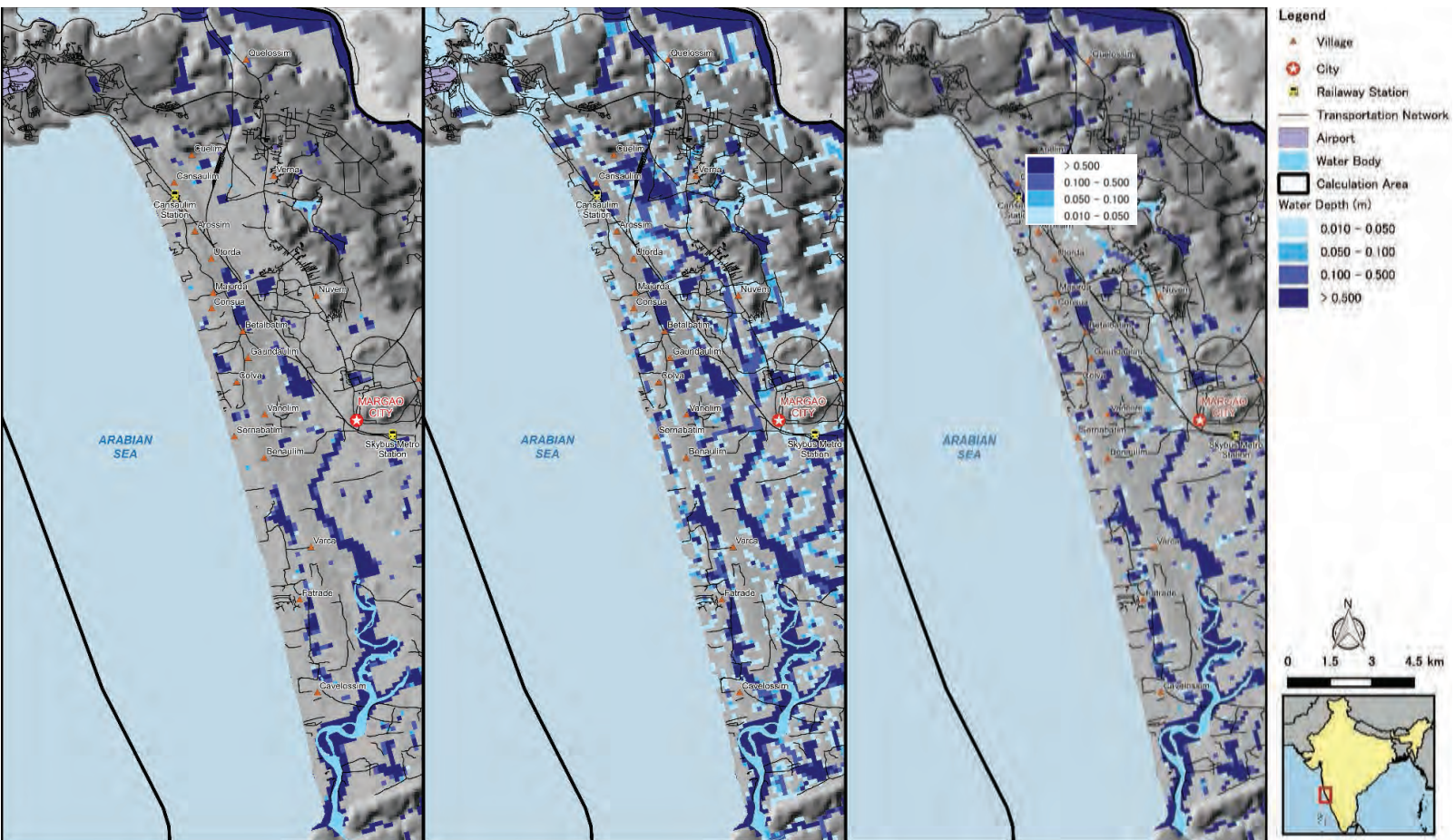


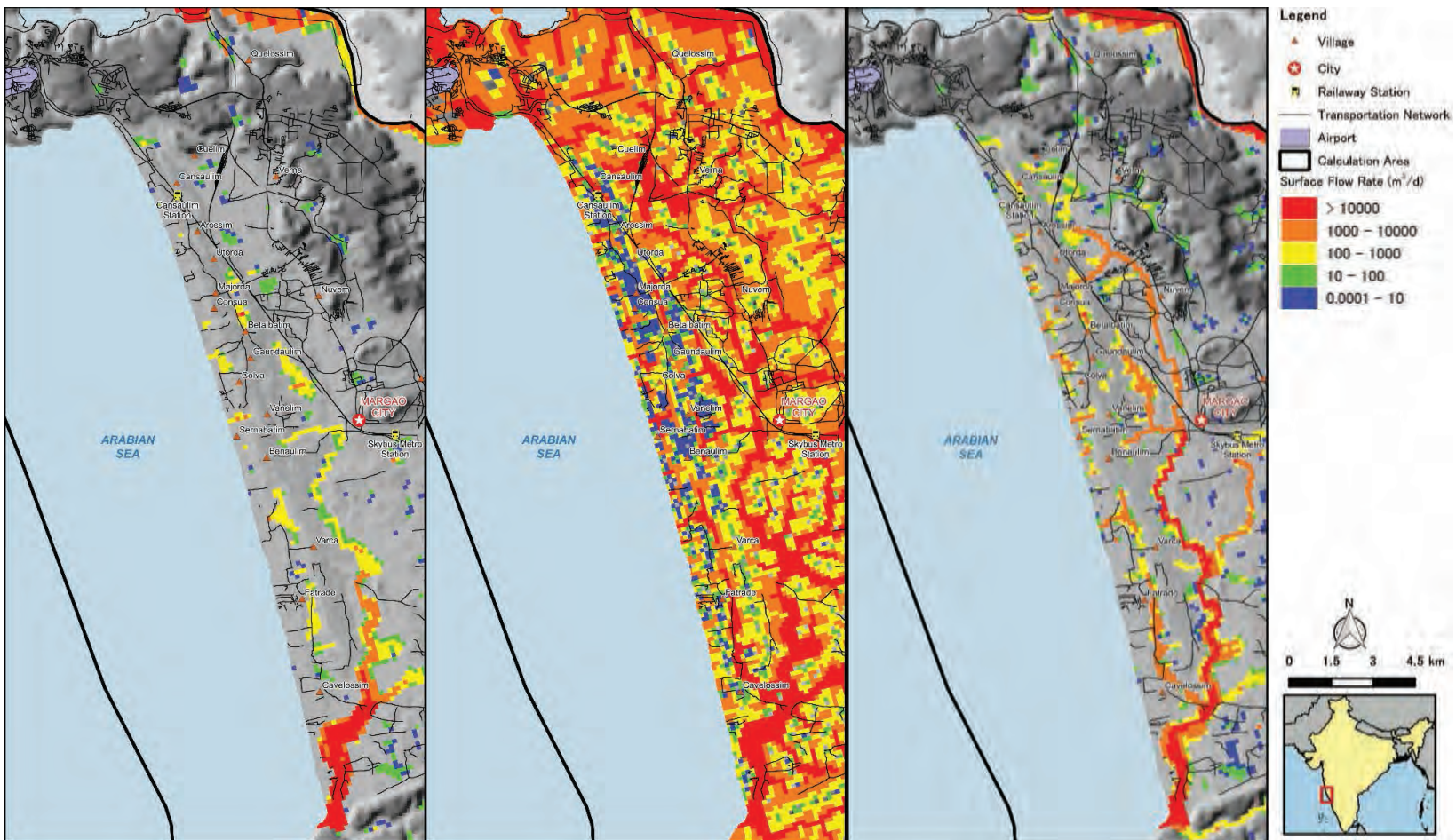
図 6-1 地表水の水深分布拡大図 (左: 5月 中: 7月 右: 11月)

6.2. 地表水の流動量分布

サル川近傍を拡大した地表水の1日当たりの流動量を図 6-2 に示す。

モンスーン季以外は、河道以外の部分では地表水の流動はほとんど見られないが、モンスーン季には、地域全体で地表水の流動が見られ、地域全体で降雨が地表水となって流れていることが確認できる。

图 6-2 地表水流动量扩大图 (左: 5月 中: 7月 右: 11月)



6.3. 地下水位分布

サル川近傍を拡大した自由地下水位標高の等高線図を図 6-3 に示す。また、サル川近傍を拡大した自由地下水位の地表面からの深さを表す等深線図を図 6-4 に示す。

モンスーン季には、降雨による地中への地下水涵養が進行し、河川流域の地形が平坦な部分では、自由地下水位が地表面に達して、浸水状態であることが分かる。また、丘陵部でも、自由地下水位が地表面近傍まで上昇していることが分かる。モンスーン後には、丘陵部から地下水位の低下が大きくなり、モンスーン前には、丘陵部の地下水位低下が大きくなり、平坦部でも地下水位が低下している。

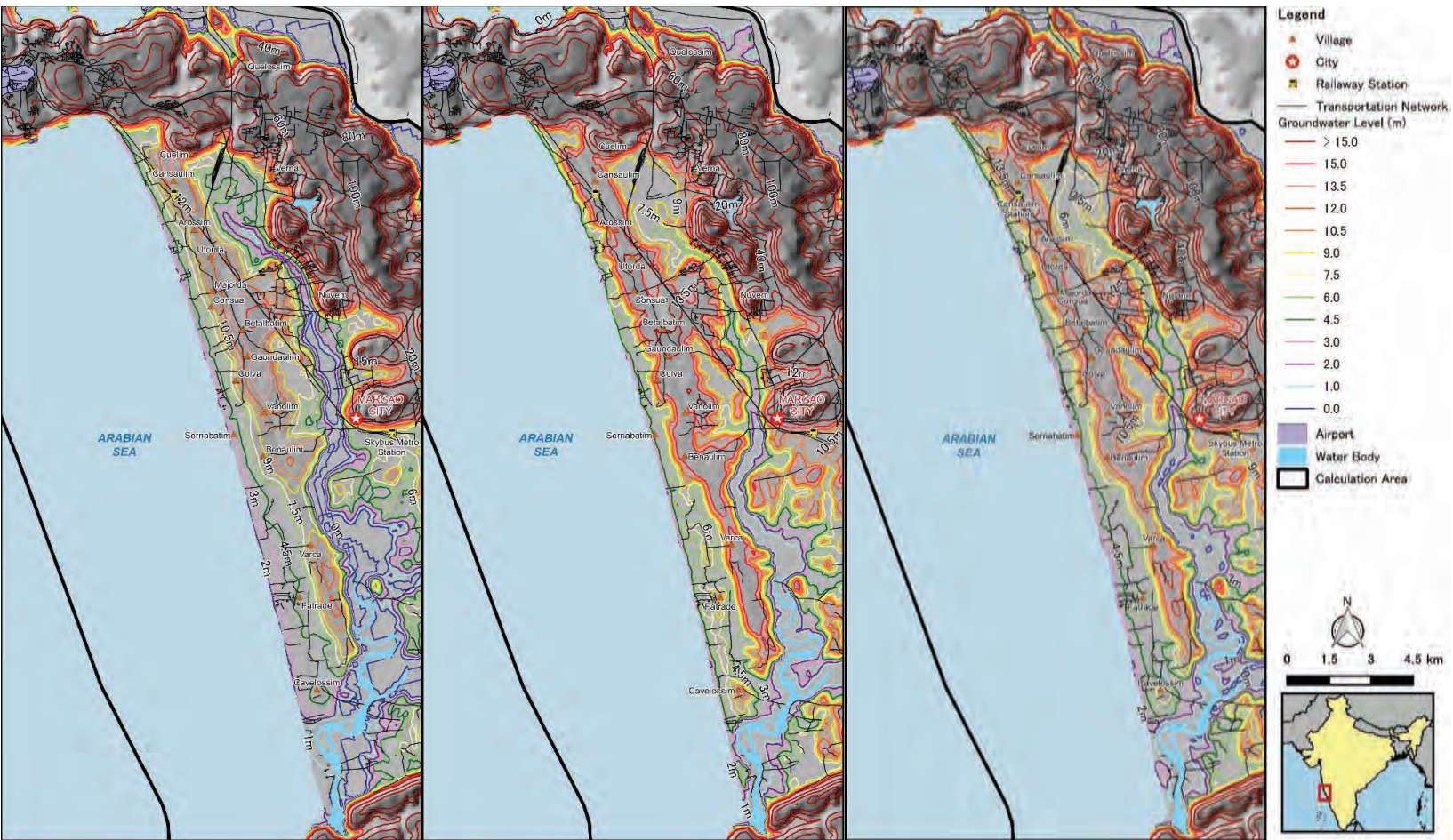


图 6-3 自由地下水位分布扩大图【标高表示】(左: 5月 中: 7月 右: 11月)

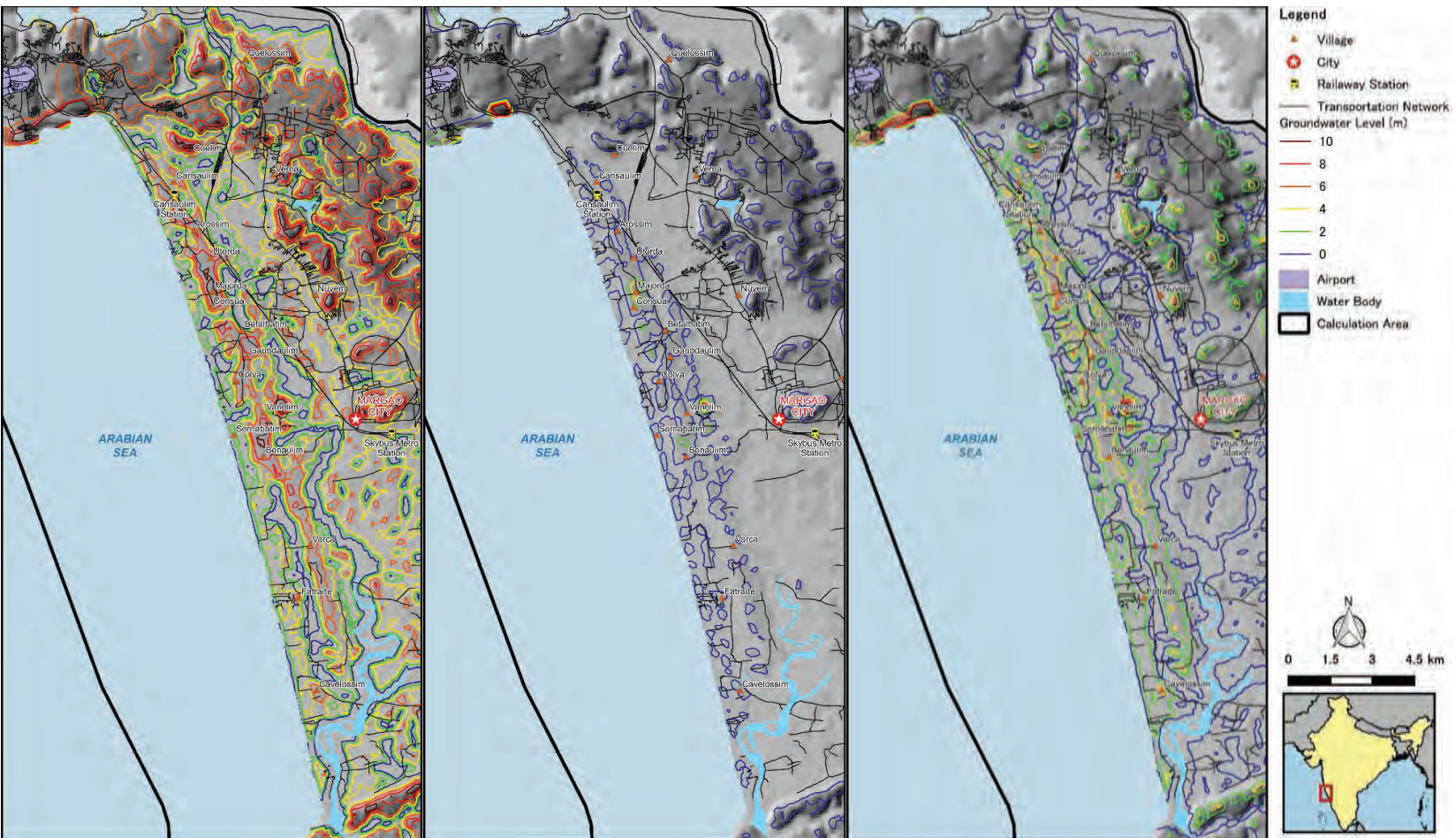


图 6-4 自由地下水水位分布【GL-表示】(左:5月 中:7月 右:11月)

6.4. 帯水層中心付近の塩分濃度

海岸部の井戸への塩水侵入が問題となっていることから、帯水層の塩分濃度を検討した。塩分濃度の季節による変動はほとんど見られない。

また、地下水の利用に対して最も塩分の影響が大きいと考えられるモンスーン前（5月）について、海岸線を横切る1断面を抽出し、その断面における塩分濃度分布を図6-5に示す。海岸部付近の陸側地下の塩分濃度が、鉛直方向の深さに伴い漸増していることが確認できる。

これより、海岸付近では海岸から2.0kmまでは、地表近傍まで塩水が侵入している（解析上の水平解像度が海岸線付近では200mである）。また、海岸から2.0km以上離れた地点でも、地下水を利用している井戸の深さが30m程度より深い場合には、塩水の影響を受けている可能性がある。

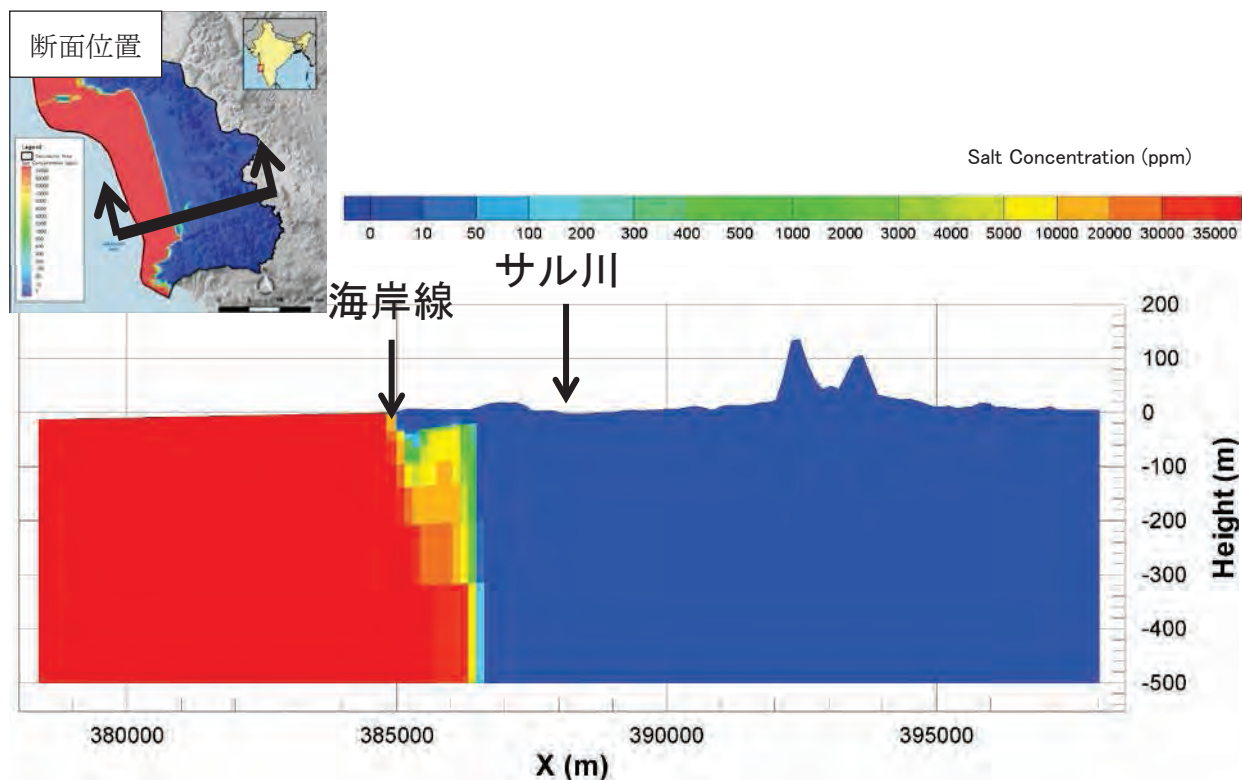


図 6-5 断面における塩分濃度（5月：モンスーン前）

6.5. 流跡線

第1帯水層を出発点とした流跡線図を図 6-6～図 6-8 に示す。青線は地表水の流れ、赤線は地下水の流れを示している。サル川から海岸線までの拡大図を図 6-9 に示す。

季節を問わず、海岸線付近を南北に縦断する丘陵地（砂丘）よりも海側では、第1帯水層を出発点とした水粒子の多くは、海底で湧水していることがわかる

モンスーン前（5月）では、第1帯水層を出発点とした地下水は海岸付近を除き、地表に湧き出し、河川部を地表水として流れている（図 6-21）。これは、モンスーン季前の河川水は、主に地下水により供給されていることを示している。

これに対し、モンスーン季（7月）およびモンスーン後（11月）では、地下水として流下している水粒子の軌跡部分（赤色）が長く、地下水として涵養されている様子が表されていると考えられる。

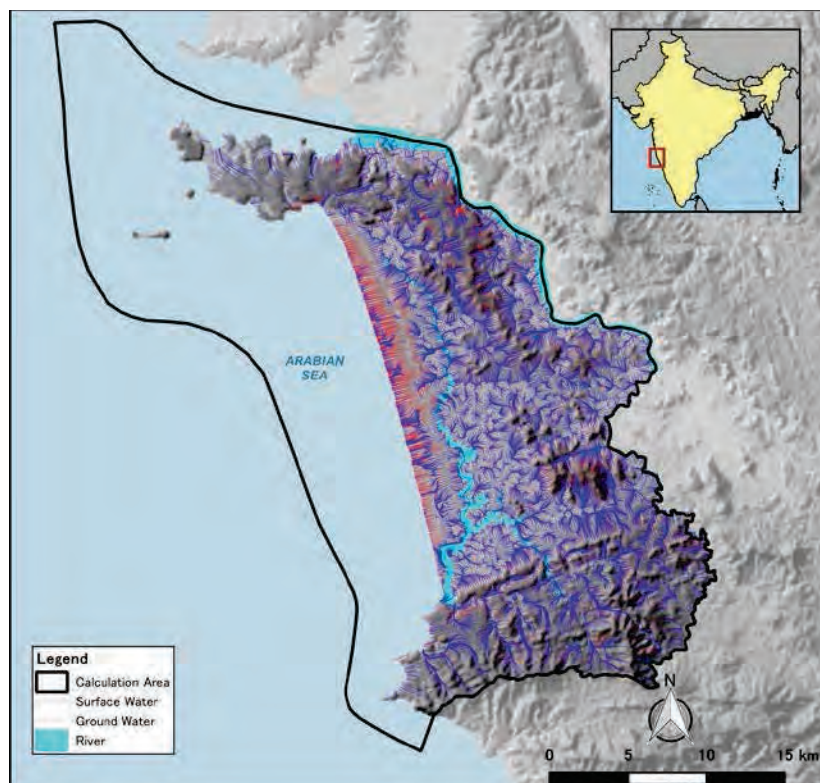


図 6-6 第1帯水層を出発点とした粒子追跡解析結果（5月：モンスーン前）

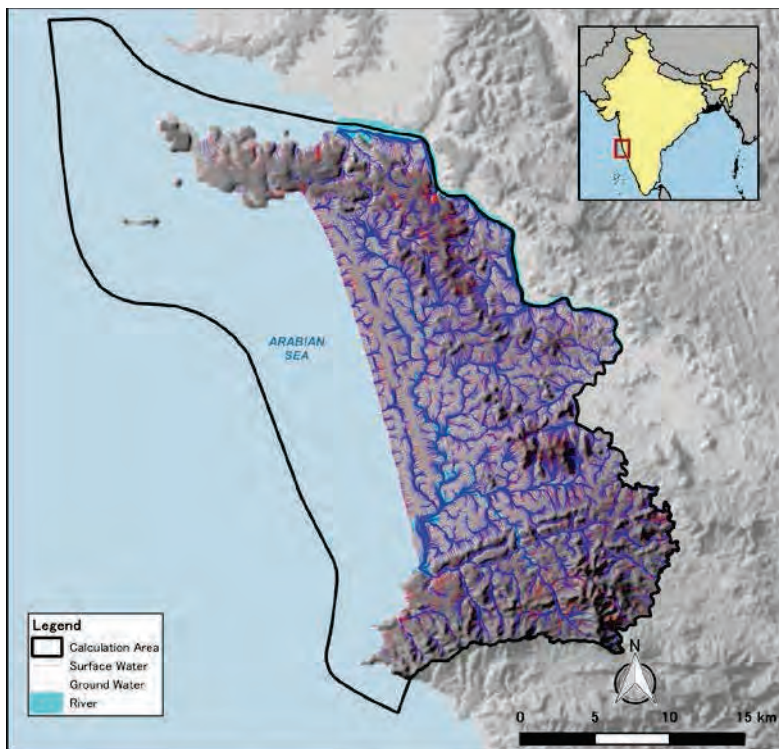


図 6-7 第 1 滞水層を出発点とした粒子追跡解析結果（7 月：モンスーン季）

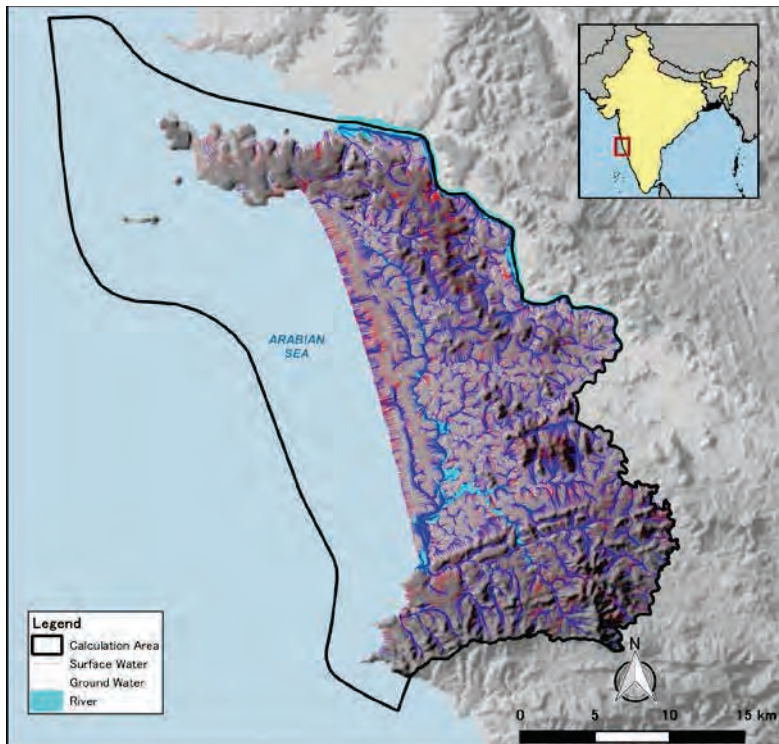


図 6-8 第 1 滞水層を出発点とした粒子追跡解析結果（11 月：モンスーン後）

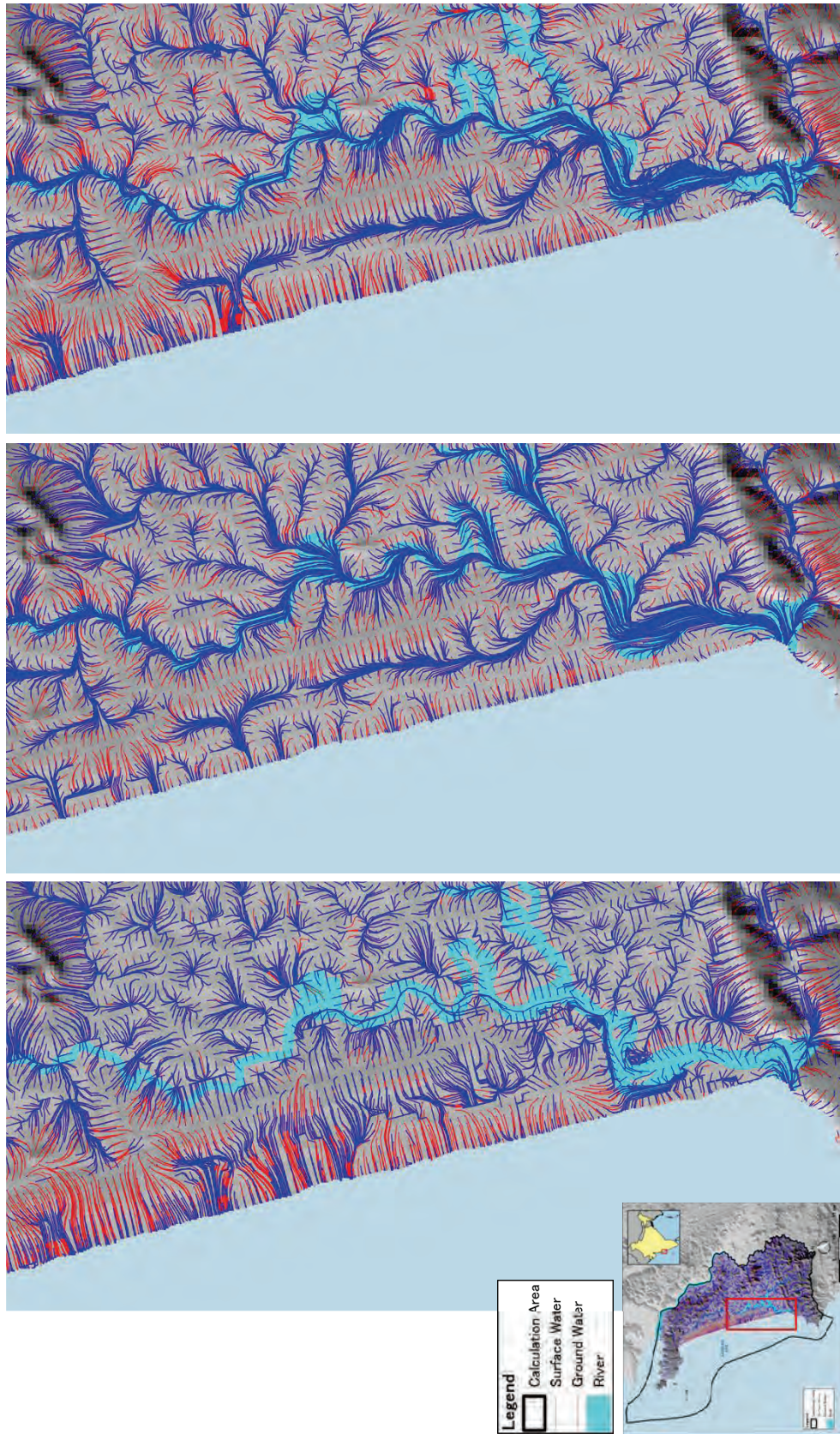


図 6-9 第1滞水層を出発点とした粒子追跡解析結果の拡大図、左：5月（モンスーン前）、中：7月（モンスーン季）、右：11月（モンスーン後）

7. 人為的な水利用（地下水揚水）を考慮した現況再現

人為的な水利用として、検討対象地域における地下水揚水の影響を考慮した解析を行った。地下水の利用としては、農業利用について考慮した。解析は、サル川流域の平均的な気象外力を用いた定常解析による平衡流動場を求めた後、日単位の非定常解析により再現した。ただし、自然状態の非定常解析と同様に、気象データは月単位で与えているため、各月（1か月間）は同一の気象外力として入力した。

農業による地下水利用は、以下のように考え、モデルに反映した。

- ① ゴア州における主要な農作物はコメであり、二期作または小麦との二毛作が多いため、年間を通して農業用灌漑がおこなわれているものとする。
- ② 農業用の灌漑は、農用地で地下から揚水し、地表面に灌漑（散布）する。
- ③ 土地利用分類で「Cropland」、「Paddy Field」、「Cropland/Other Vegetation Mosaic」を灌漑対象の農地とした。
- ④ 地下水の揚水深度は帯水層下面とした。
- ⑤ 地下水揚水量は、文献値⁷⁻¹⁾より、次のように試算した。

$$1.79\text{mm/day} = \text{モデル領域内で約 } 1.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{year}$$

当該地域の典型的な気象環境として、自然状態の再現と同様に、モンスーン前（5月）、モンスーン季（7月）、モンスーン後（11月）を抽出した。ここでは、自然状態の再現結果として求められた地下水位と比較した。以下では、この5月、7月、11月の各月について解析結果を示す。

7.1. 自然状態の地下水位と揚水を考慮した場合の地下水位との比較

自由地下水の水位への農業用灌漑に伴う地下水揚水による影響を評価するため、自然状態における自由地下水面標高と、地下水揚水を行った状態における自由地下水面標高との水位差を求めた。両者の自由地下水面の標高差の分布を図 7-1~図 7-3 に示す。

サル川の河道近傍では、両者の差は年間を通じてほとんど見られない。

モンスーン季に降雨により地下水が涵養され（図 7-2）、その地下水が年間を通じて揚水されて灌漑用水として利用されている。したがって、モンスーン季（7月）には両者の差はなく、モンスーン明け以降、日数を経るに従い、揚水の影響により自然状態との差は大きくなり（図 7-3）、モンスーン季直前には両者の差は最大となっている（図 7-1）。

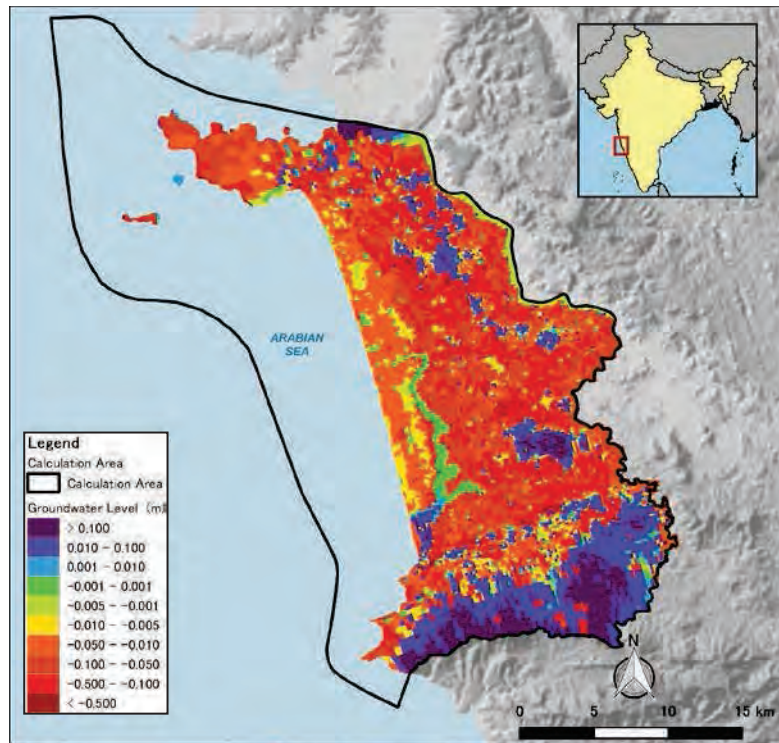


図 7-1 自然状態と農業用揚水を考慮した状態との地下水位の差（5月：モンスーン前）

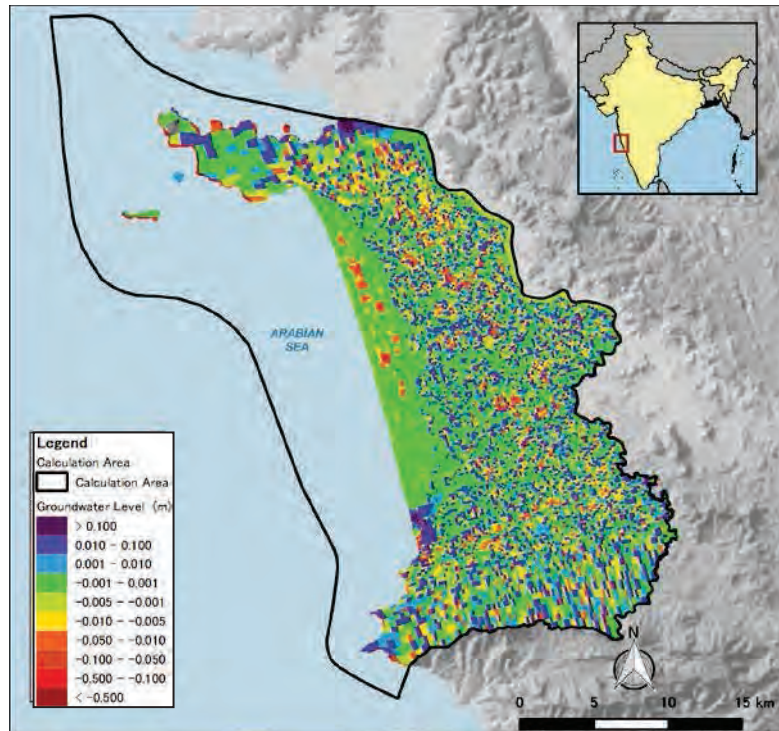


図 7-2 自然状態と農業用揚水を考慮した状態との地下水位の差（7月：モンスーン季）

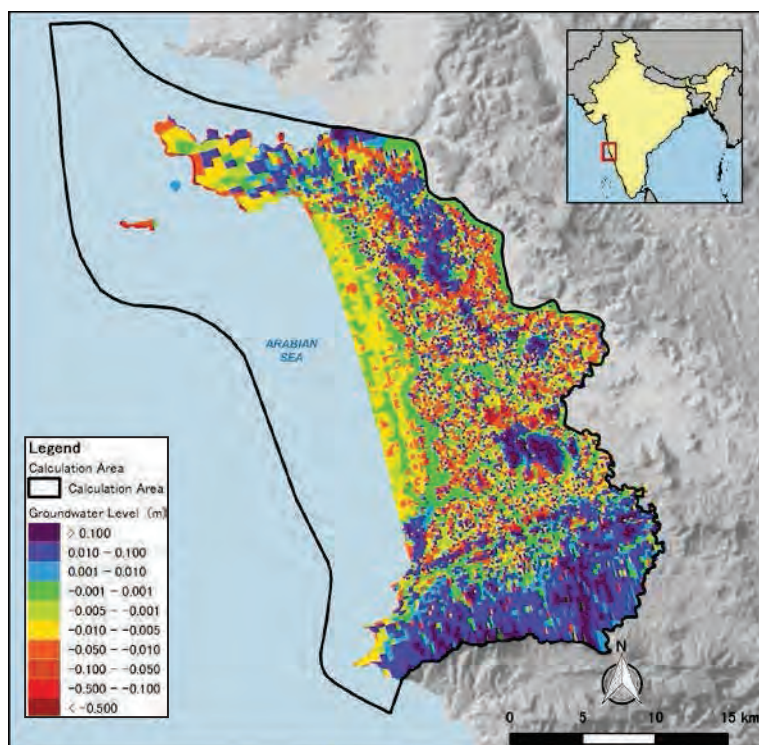


図 7-3 自然状態と農業用揚水を考慮した状態との地下水位の差（11月：モンスーン後）

7.2. 水収支

7.2.1. 水収支の概念

水収支は、一定の地域において一定の期間に流入する水の量と流出する水の量との収支を計算して評価する。人為的な水利用を考慮した水収支の概念を図 7-4 に示す。対象領域を地表部と地下部に分割し、解析により得られた結果を集計して、水収支を計算した。

以下では、人為的な水利用としての農業用の地下水揚水を考慮した水収支を算定した。

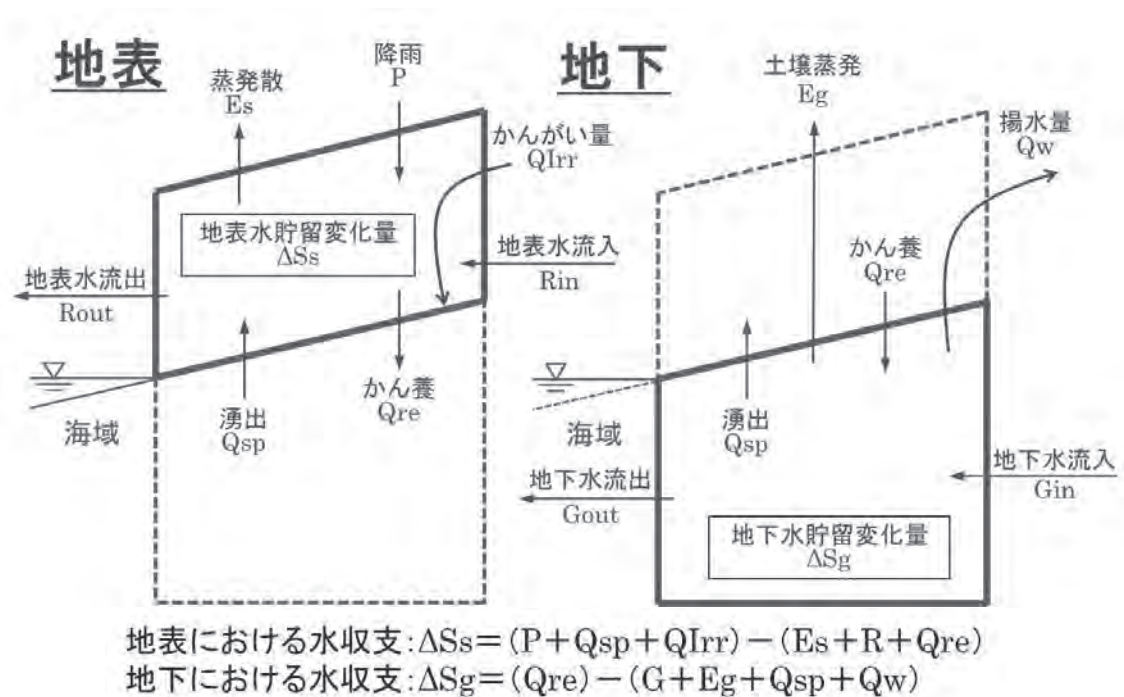


図 7-4 水収支の概念図

7.2.2. 解析領域全体の年間水収支

解析領域全体を水収支の集計範囲として、年間の水収支を算定した。概念図に集計値を併記した図を図 7-5 に、集計表を表 7-1 に示す。ここで、水利用に関して、農業用の利水だけを考え、領域外から導水はないものとし、揚水された地下水量はすべて領域内に撒くものとしているため、解析領域全体を考えた場合には、地下水揚水量とかん養量は等しくなる。ただし、工業用および上水道等としての地下水利用は考慮していないので、結果の取扱いには注意が必要である。

解析領域全体をとらえた場合の領域外部との収支は次の通り。

- ・ 領域内へは、降雨として水が供給される。
- ・ 領域外へは、地表水および地下水としての流出と、地表水からおよび土壌からの蒸発散として流出する。
- ・ 領域内への貯留量は、流入量と流出量との差により算定される。

これらの水収支の算定結果をまとめると以下のようなになる。

- ・ 解析領域全体の年間水収支は、降雨として供給された水量(1,529 百万 t/年)のうち、1,118 百万 t/年(73.1%)が地表水として、20 百万 t/年(1.3%)が地下水として流出する。地表水からの蒸発散量 306 百万 t/年、土壌からの蒸発量 85 百万 t/年である。
- ・ 解析領域全体の年間涵養量は 236 百万 t/年、年間湧出量は 128 百万 t/年である。
- ・ 解析領域全体として、地下水貯留量は年間 98 万 t 増加している。

以上より、農業用水として地下水を利用しても、地下水貯留量が増加しており、地下水賦存量へ与える影響はほとんどないものと考えられる。

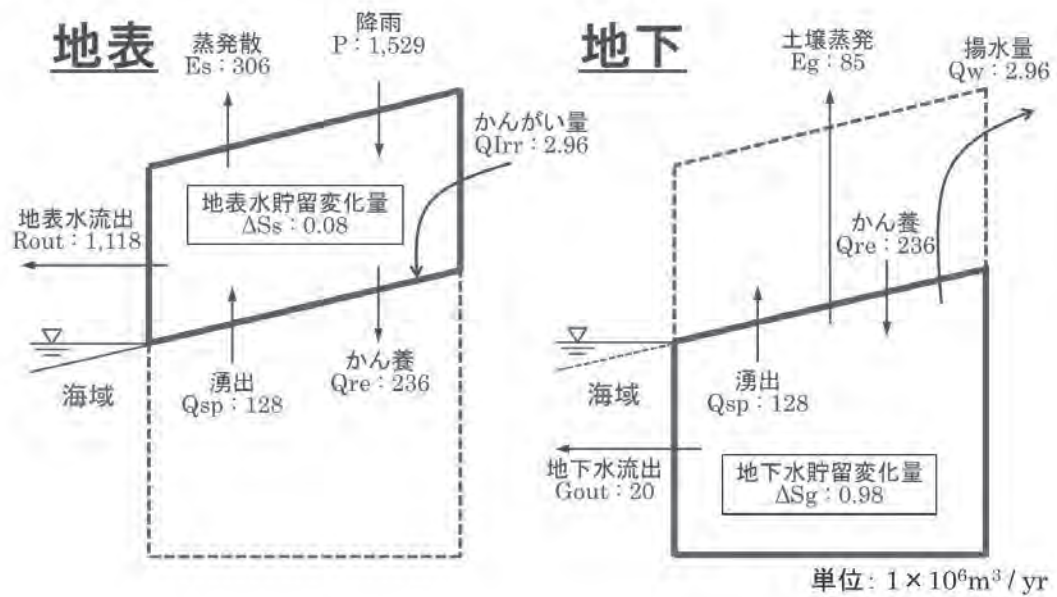


図 7-5 解析領域全体の年間水収支集計結果

表 7-1 解析領域全体の年間水収支集計結果

水収支内訳		年間集計値 ($1 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{yr}$)	
流入量	P	降水量	1,529
	Qirr	かんがい量	2.96
流出量	Es	地表水蒸発散量	306
	Eg	土壌水蒸発散量	85
	R	地表水流出量	1,118
	G	地下水流出量	20
	Qw	揚水量	2.96
範囲内諸量	Qre	かん養量	236
	Qsp	湧出量	128
貯留量	ΔSs	地表水貯留量 (変化)	0.08
	ΔSg	地下水貯留量 (変化)	0.98

7.2.3. 市街地（都市部）の水収支

都市域の地下水利水の可能性を水収支の点から検討する。都市域の代表的な地域として、マーガオ（Margao）地域に着目して水収支を集計した。解析モデル上の集計範囲を図 7-6 に赤枠で示す。この集計範囲は Margao の行政管轄区の範囲とは厳密には一致していない。

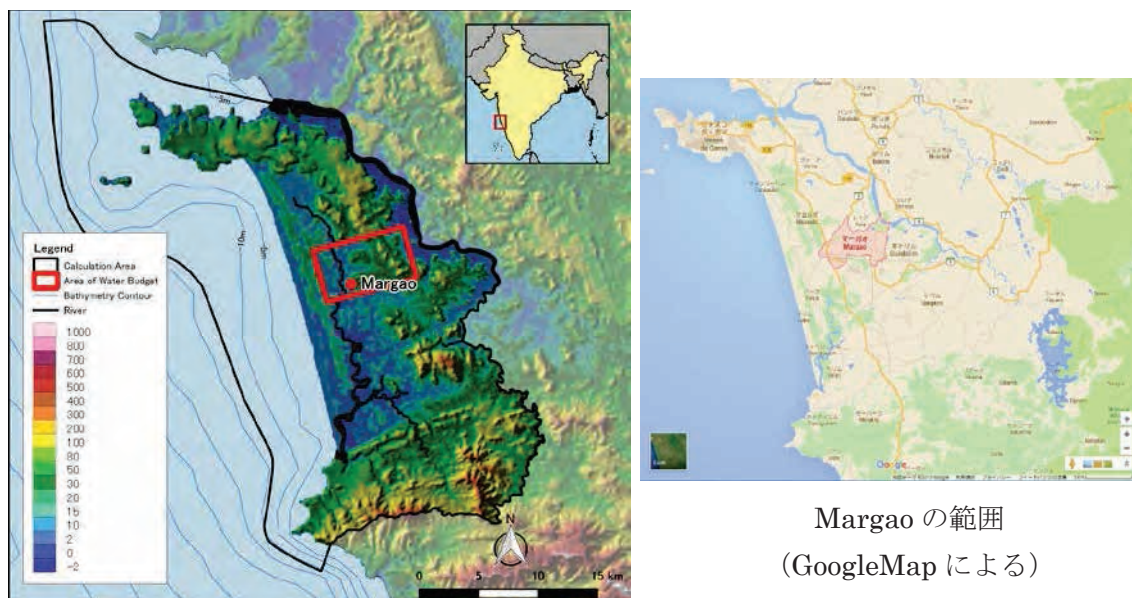


図 7-6 Margao 地域の水収支集計範囲

最初に、Margao 地域の年間水収支を算定した。概念図に集計値を併記した図を図 7-7 に、集計表を表 7-2 に示す。解析領域内から水収支を算定する領域を抽出した場合、水収支検討範囲には降雨と地表水および地下水の流入によって水が供給される。

水収支の算定結果をまとめると以下ようになる。

- ・ 地表水の貯留量は変化しない。
- ・ Margao 地域では地表水としての流入量が降雨による供給量を上回っている。
- ・ 地表水の流出量の増加量 81.7 (=193.2-111.5) 百万 t/年は、対象地域への降水量 102 百万 t/年の 80%相当である。
- ・ Margao 地域の地下水貯留量変化量は 6 万 t/年とわずかである。
- ・ Margao 地域の地下水流入量 890 万 t/年、地下水流出量 210 万 t/年であり、地域内の地下水涵養量 1,180 万 t/年を維持しなければ、地下水貯留量は減少すると予想される。
- ・ 地表からの地下水涵養量 1180 万 t/年に対して、サル川から地下水に供給される涵養量は 14 万 t/年と地下水涵養量全体の 1%程度にとどまっている。
- ・ 地下水の地表への湧出量 8 百万 t/年に対して、地下水のサル川への湧出量は 23 万 t/年と湧出量全体の 2.9%程度となっている。

地下水利用（揚水）は農業用の利水しか考慮していないため、市街地として設定されている Margao 地域では、地下水揚水は計算上考慮されていない。実際には、工業用あるいは

上水利用としての地下水揚水がある程度なされているものと考えられる。前節で検討した解析領域全体の場合とは異なり、Margao 地域では地下水貯留量の増加は 6 万 t/年とわずかであり、工業用あるいは上水道としての地下水利用を考慮した場合には、地下水貯留量は減少する可能性がある。

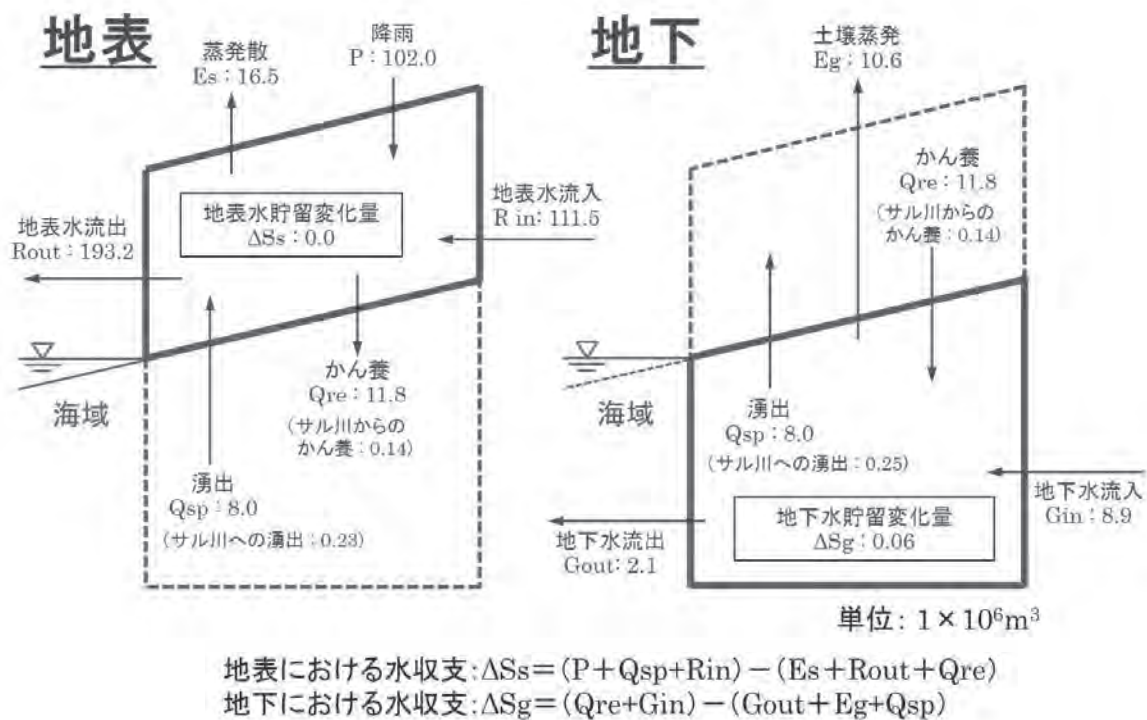


図 7-7 Margao 地域の年間水収支集計結果

表 7-2 Margao 地域の年間水収支集計結果

水収支内訳		年間集計値 ($1 \times 10^6 \text{m}^3 / \text{yr}$)	
流入量	P	降水量	102.0
	Rin	地表水流入量	111.5
	Gin	地下水流入量	8.9
流出量	Es	地表水蒸発散量	16.5
	Eg	土壌水蒸発散量	10.6
	Ro	地表水流出量	193.2
	G	地下水流出量	6.81
範囲内諸量	Qre	かん養量	11.8
	Qsp	湧出量	0.23
貯留量	ΔSs	地表水貯留量 (変化)	0.0
	ΔSg	地下水貯留量 (変化)	0.06

次に、上記の 1 年間として求めた水収支を分析するため、降水量の季節的な変動を考慮した水収支、すなわちモンスーン季と非モンスーン季に分けて水収支を集計した。モンスーン季として 6 月 1 日から 10 月 31 日、非モンスーン季として、11 月 1 日から 5 月 31 日の期間を設定した。集計結果を図 7-8 および表 7-3 に示す。なお、図 7-8 にはサル川からの涵養量とサル川への湧出量もあわせて示した。

水収支の算定結果をまとめると以下のようなになる。

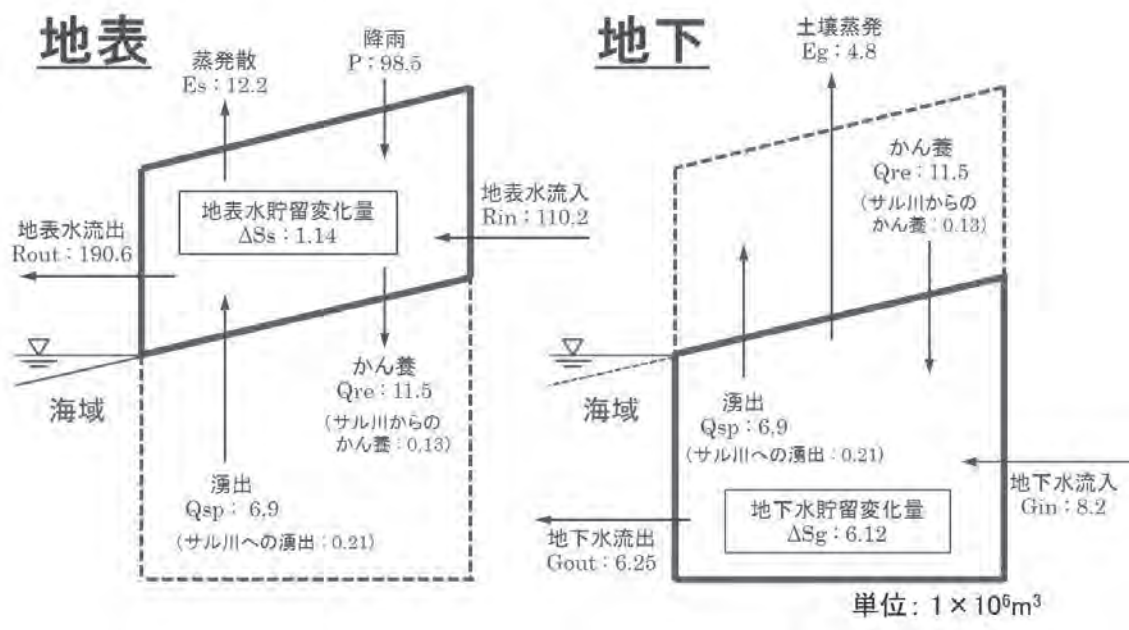
- ・ 地表水貯留量はモンスーン季に 114 万 t 増加するが、非モンスーン季に 114 万 t 減少し、年間水収支の集計値 0 と一致する。
- ・ 地下水貯留量はモンスーン季に 612 万 t 増加し、非モンスーン季に 606 万 t 減少する。その差 6 万 t が年間の地下水貯留増加量に相当する。
- ・ モンスーン季には、全流出量 25,045 万 t のうち、地表水としての流出量が 19,060 万 t (76.1%) となる。
- ・ 非モンスーン季の地表水流出量 270 万 t は、流出量全体 (1,336 万 t) の 20.2% に過ぎない。
- ・ 非モンスーン季の地表からの蒸発散量と地中からの土壌蒸発とを合わせた量は 1,010 万 t であり、非モンスーン季の流出量全体の 75.6% になる。
- ・ 地表面からの地下水の涵養量は、モンスーン季にその大部分である 1,150 万 t (全体量の 97.5%) が供給される。
- ・ 地表面への地下水の湧出量は、モンスーン季に 690 万 t (全体量の 85.2%)、非モンスーン季に 120 万 t (全体量の 14.8%) である。
- ・ 非モンスーン季のサル川への湧出量は 2 万 t であり、Margao 地域では非モンスーン季に地下水からサル川への湧出量は少ないといえる。

現状では、Margao 地域の都市化に伴い、上水道等による地下水揚水量が増加すると、地下水賦存量が減少する可能性が示唆される。都市モデル例としての Margao 地域に限定して考えられる対策の考え方としては、

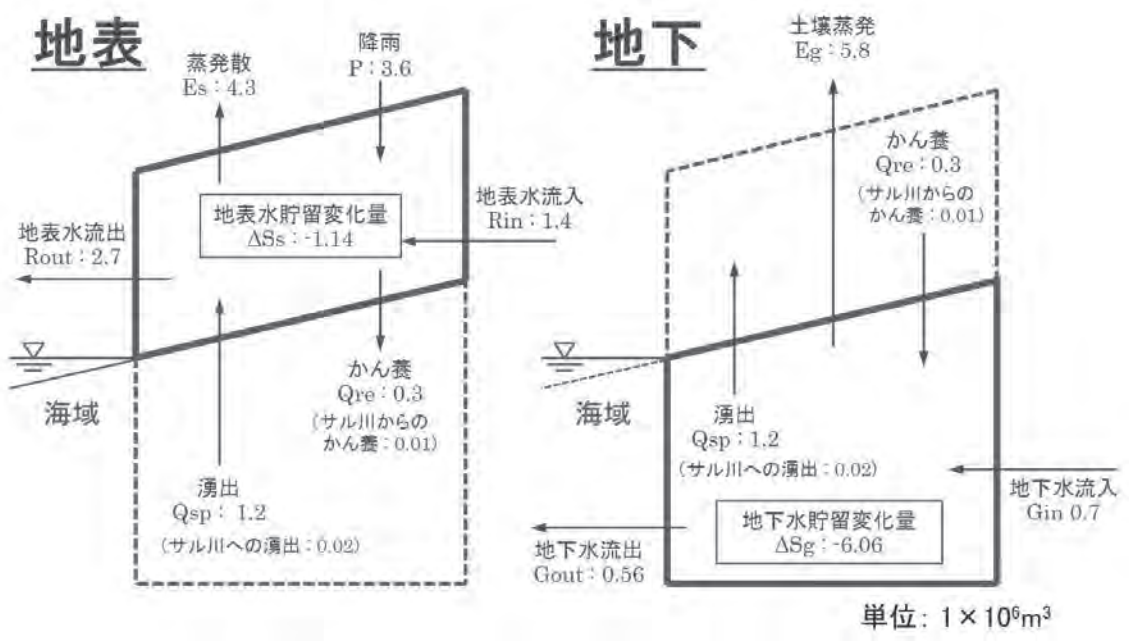
- ・ モンスーン季の降雨や河川水を貯留し、非モンスーン季にその貯留水を利用して地下水の揚水量の増加量を少なくする。
- ・ モンスーン季の地下水涵養量を保全する対策として、水源地保全対策を促進する。
- ・ 植栽等を整備し、表面からの蒸発散量を抑制する。

などが考えられる。

このうち、モンスーン季の降雨を貯留し利用する方策としては、モンスーン季の地表水(雨水や河川水)を貯留するインフラを整備・配置する。ただし、雨水貯留施設の場合には、貯留施設は非モンスーン季の降雨も貯留できるものとする。これらの施設から一定の処理を施した水道水(上水道あるいは中水道)として地域に配水するインフラを整備することにより、都市域が拡大した場合の市街地整備を行う上でも、効果的な対策であると考えられる。



モンスーン季 (6/1-10/31) の集計結果



非モンスーン季 (11/1-5/31) の集計結果

地表における水収支: $\Delta S_s = (P + Q_{sp} + R_{in}) - (E_s + R_{out} + Q_{re})$
 地下における水収支: $\Delta S_g = (Q_{re} + G_{in}) - (G_{out} + E_g + Q_{sp})$

図 7-8 Margao 地域の水収支集計結果 (モンスーン季および非モンスーン季別)

表 7-3 Margao 地域の水収支集計結果（モンスーン季および非モンスーン季別）

水収支内訳			モンスーン季集計値 (期間：6/1 - 10/31) ($1 \times 10^6 \text{ m}^3$)	非モンスーン季集計値 (期間：11/1 - 5/31) ($1 \times 10^6 \text{ m}^3$)
流入量	P	降水量	98.5	3.6
	Rin	地表水流入量	110.2	1.4
	Gin	地下水流入量	8.2	0.7
流出量	Es	地表水蒸発散量	12.2	4.3
	Eg	土壌水蒸発散量	4.8	5.8
	Ro	地表水流出量	190.6	2.7
	G	地下水流出量	6.25	0.56
範囲内 諸量	Qre	かん養量	11.5	0.3
	Qsp	湧出量	6.9	1.2
貯留量	ΔSs	地表水貯留量(変化)	1.14	-1.14
	ΔSg	地下水貯留量(変化)	6.12	-6.06

地下水揚水量引用文献

7-1) FAO aquastat Water Report 37, 2012 india

(http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ind/index.stm)

8. 洪水時の水深分布の再現

サル川流域で、日単位の気象観測データが入手可能な期間における過去に発生した洪水による浸水および蒸発散による浸水域の後退状況を再現する。

解析対象期間は、洪水をもたらす降雨発生日から1週間とした。再現対象の洪水として、過去最大規模の洪水と同程度の降雨が観測された2005年7月26日～7月27日の降雨を採用した。また、32年間の平均降水量（月単位）を先行降雨として与えて得られた動的平衡場を解析の初期状態とした。

降雨外力は、次のように設定した（図8-1）。

- ① 降雨の初期条件は32年間の平均降水量（月単位）（29.3mm/day）を与え、それを7月25日の状態とした。
- ② 2005年7月26日～7月27日に Santacruz 観測所で記録された降水量944mm/dayを与えた。
- ③ 7月28日以降の降水量は32年間の平均降水量（月単位）（7月：29.3mm/day, 8月：19.5mm/day）を与えた。

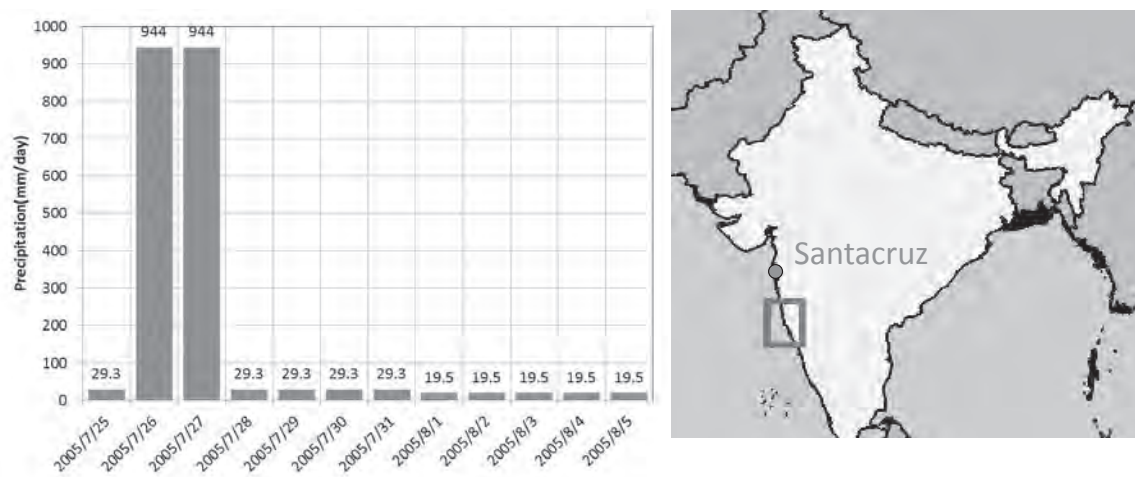


図 8-1 洪水時の再現として与えた降雨パターン

図8-2～図8-4に対象期間の地表水の水深分布図を示す。

洪水発生前の7月25日では、モンスーン季ではあるが河川近傍を除いて地表水の水深が見られず浸水していないが（図8-2）、2日間の降雨により、降雨時（7月26日）および降雨直後（7月27日）には、検討対象地域全体が浸水した状態となっている（図8-2）。しかしながら、1週間経過後の8月4日には洪水発生前に近い地表水の浸水分布となっている（図8-4）。これは、大量に降った雨による浸水も、この地域の地表面からの地表水流出量と蒸発散量が大きい（図7-5、表7-1参照）、一週間で浸水深が10cm以下になるものと考えられる。（現地照査では表層に付着した泥土の影響で浸水期間が計算結果より長期となる。）

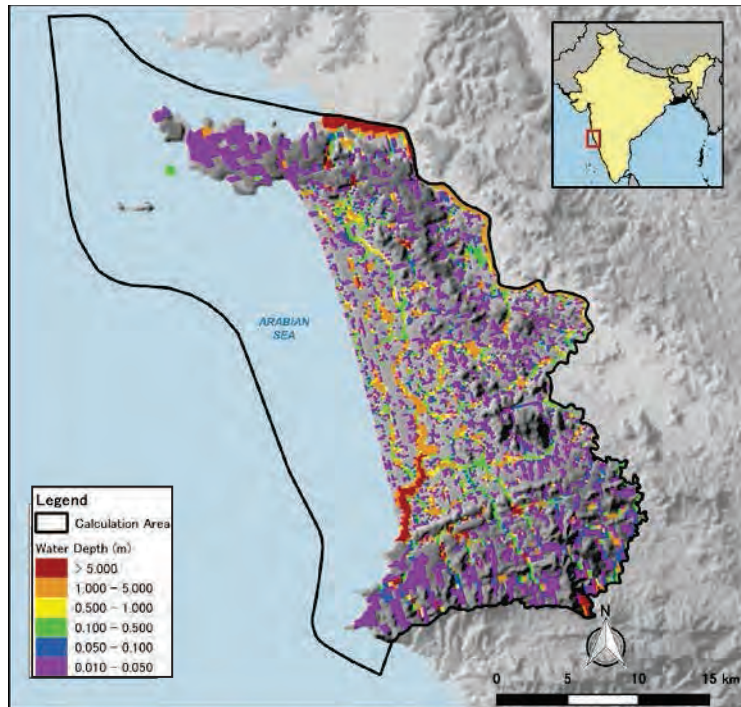


図 8-2 7月25日の地表水の水深分布（洪水発生前）

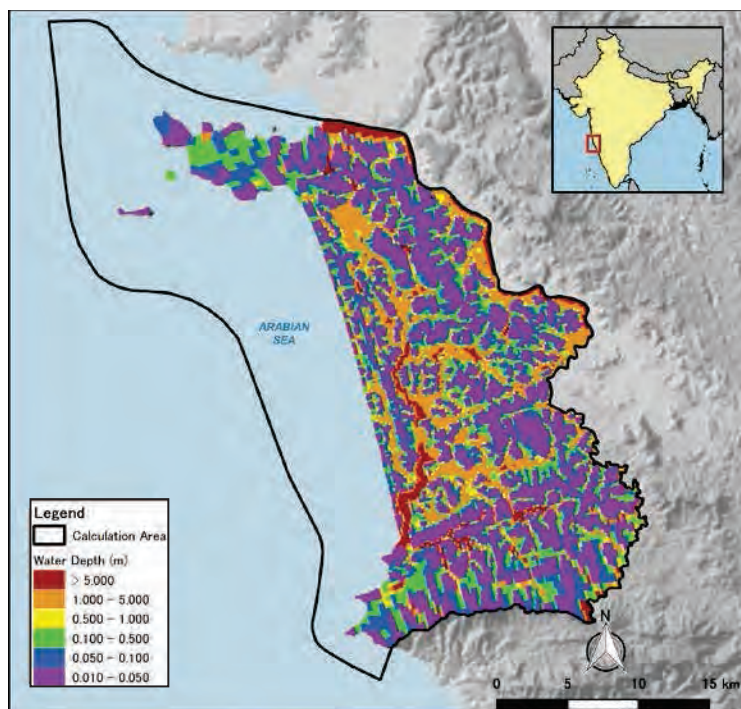


図 8-3 7月27日の地表水分布（降雨直後）

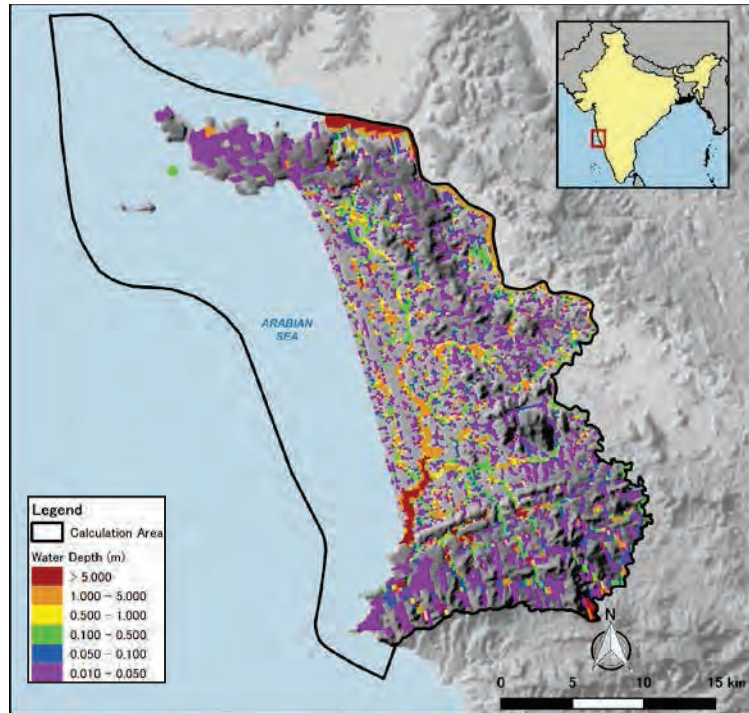


図 8-4 8月4日の地表水分布

9. 水循環の視点に立脚したサル川流域への提案

本検討で得られたサル川流域の水循環解析結果から、水循環の視点に立脚したサル川流域の都市計画策定の基礎資料ともなる提案を行う。具体的には、第 6 章で実施した地表水の分布状態および地表水流動量分布に関する解析結果および第 8 章で実施した洪水時の解析結果を基に、排水対策および水質保全対策を中心に検討する。

9.1. サル川流域の水循環の特徴

モンスーン季の地表水の水深分布および拡大図を図 9-1 に再掲する。第 6 章で述べたように、モンスーン期に集中した降雨の影響により、7 月には丘陵部を除く広い範囲で 10cm～50cm 程度の水深を有する浸水状態にある。拡大図から、表示された地域の平地部がほぼ浸水状態であることが確認できる。

また、地表水流動量から、モンスーン季に地表面を流れる地表流（図 9-3 に再掲）が土壌細粒分を伴い移動することが予想される。しかしながら、第 8 章で示したように、944mm/day の降雨が 2 日間続いても、降雨が止んだ翌週には、地表水としての流出量と蒸発量が大きいため、浸水域は大幅に減少している。また地表水の流動量はモンスーン季に著しい（図 9-2 に再掲）。

自然状態の自由地下水の水位を図 9-4 に再掲する。モンスーン季には地形が平坦な部分では自由地下水位が地表面近傍にまで上昇し、その後、徐々に地下水位が低下している。モンスーン季の降雨により地下水の涵養がなされるが、その後、地下水位は徐々に低下している。また、農業による地下水利用を考慮した場合の地下水位を図 9-5 に再掲する。土地利用の種別で農用地から揚水するケースで計算しているため、都市部では地下水の揚水は考慮されていない点に注意が必要である。モンスーン後には、降雨による地下水涵養が少なく、一定量の地下水揚水を継続しているため、地下水位は低下している。都市部の地下水利用を考えた場合には、都市部ではさらに地下水位が低下することが予想される。

検討範囲の流跡線図を図 9-6 に再掲する。モンスーン季前の河川水は、主に地下水により供給され、第 1 帯水層を出発点とした地下水は海岸付近を除き、河川部に湧き出し、河川部を地表水として流れている。モンスーン季（7 月）およびモンスーン後（11 月）では、地下水として流下している水粒子の軌跡部分（赤色）が長く、地下水として涵養されていることがわかる。

ここでは、これらの事象が、サル川の水質に影響を与える可能性について、検討を加える。さらに、地下水に関する解析結果から、地下水の水質保全についても考察する。

なお、検討対象地域を、市街地（都市部）、海岸部、耕作地に分類する。

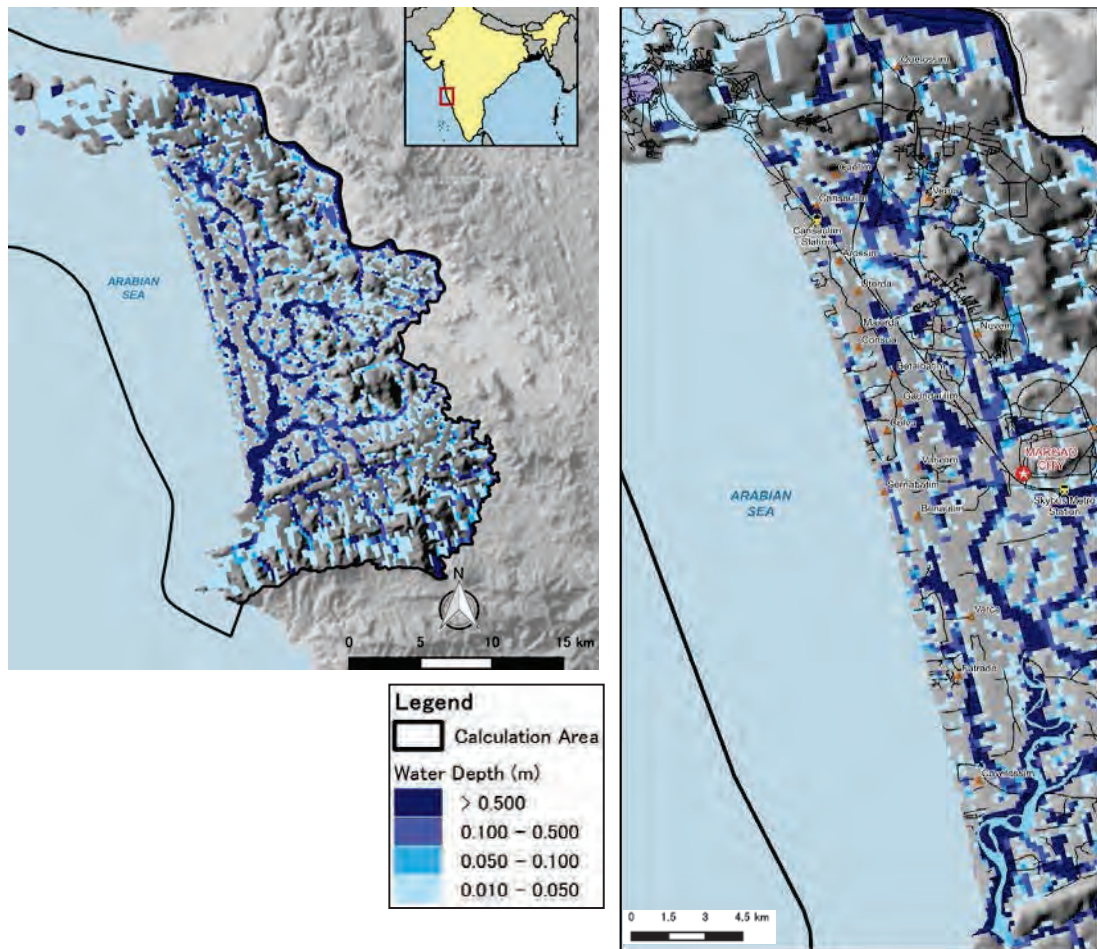


図 9-1 モンスーン季（7月）の地表水の水深分布（再掲）

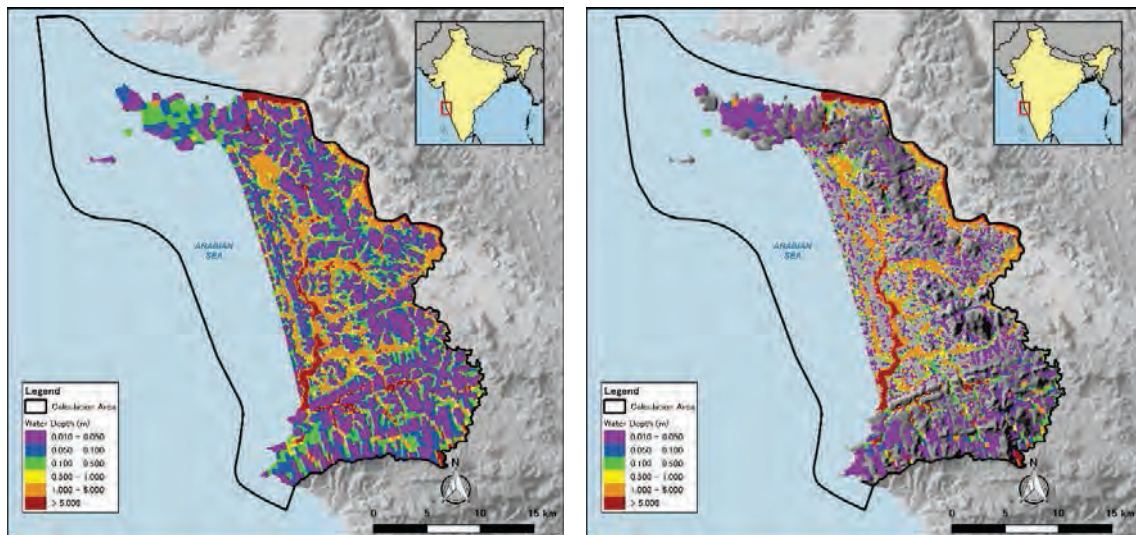


図 9-2 洪水時の地表水分布（左：降雨直後7月27日、右：降雨翌日8月4日）（再掲）

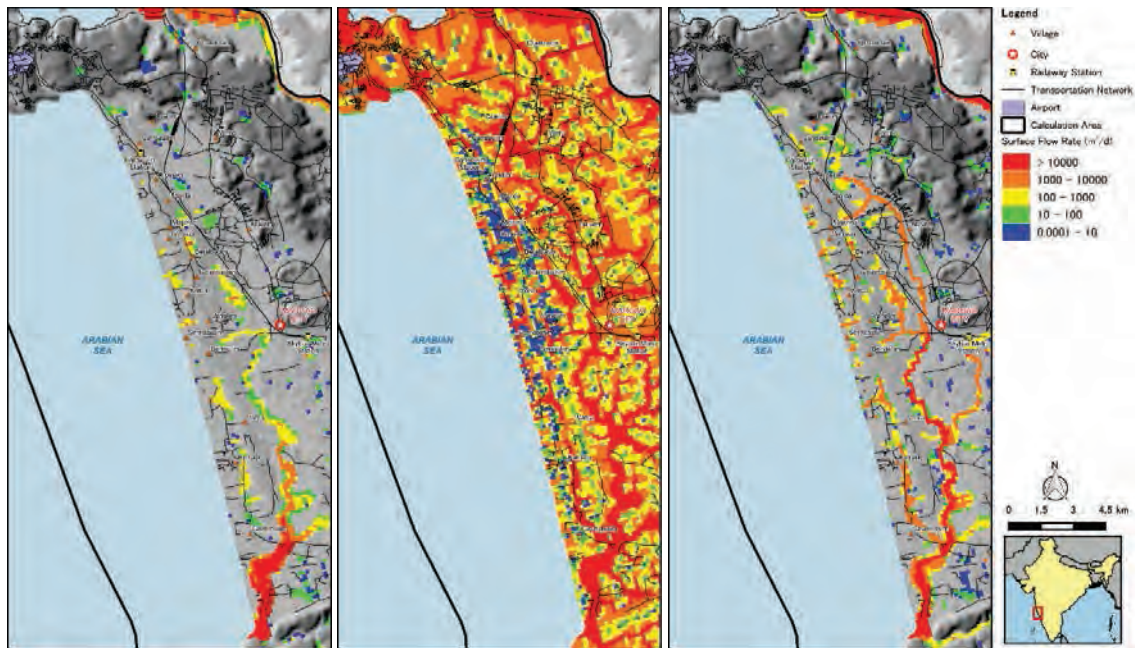


图 9-3 地表水流动量扩大图 (左: 5月 中: 7月 右: 11月) (再掲)

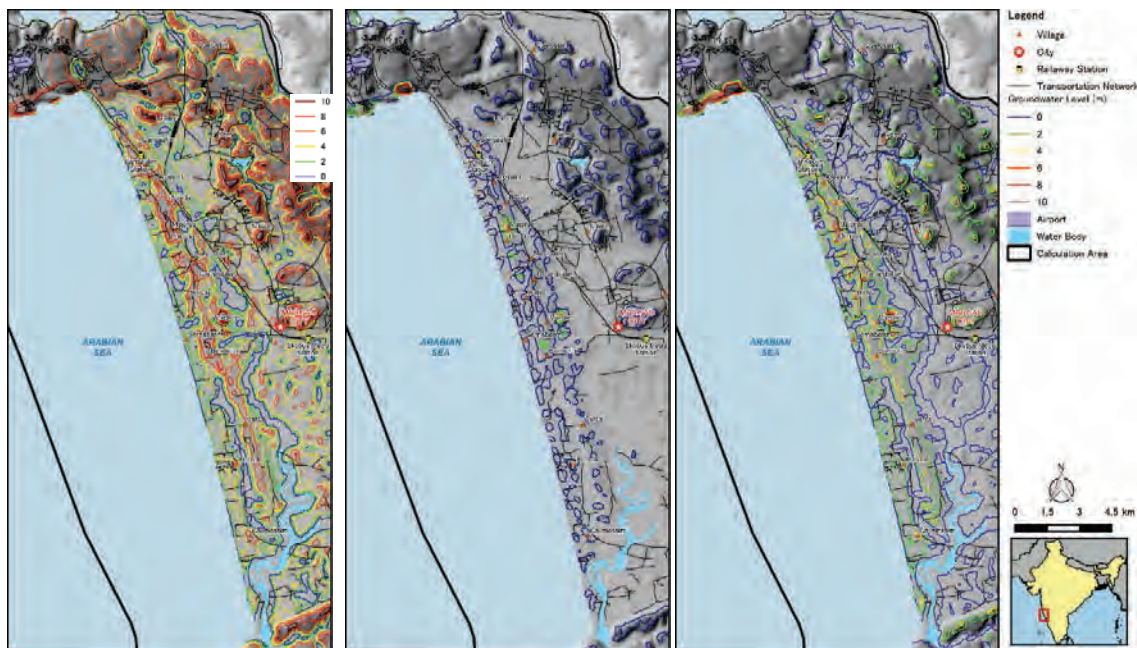
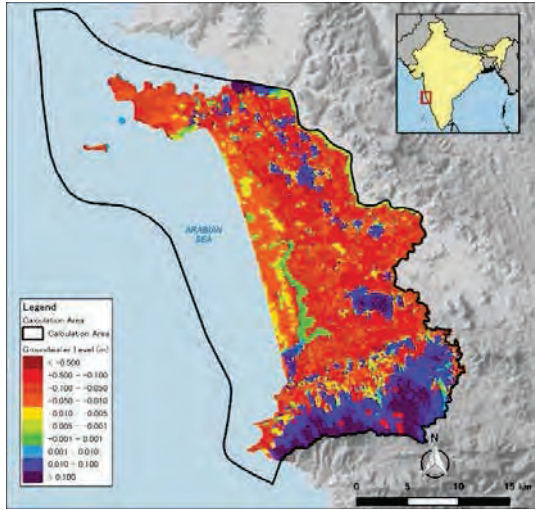
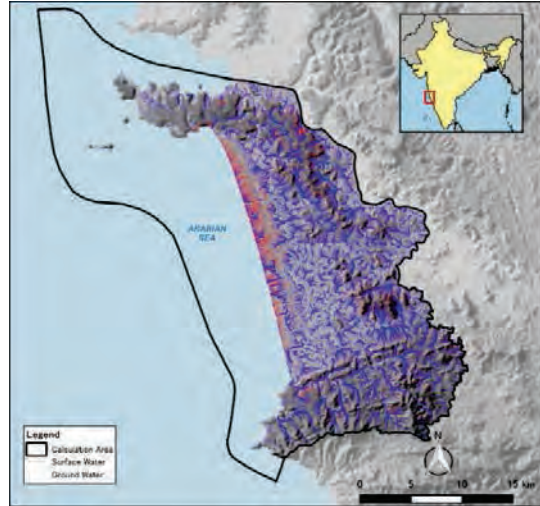


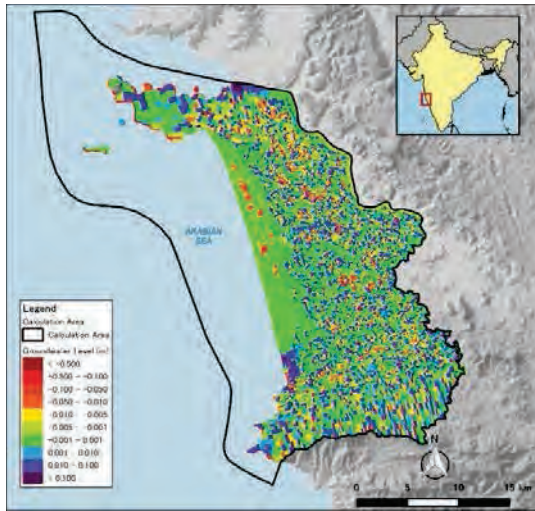
图 9-4 自然状态の自由地下水位分布【GL-表示】(左: 5月 中: 7月 右: 11月) (再掲)



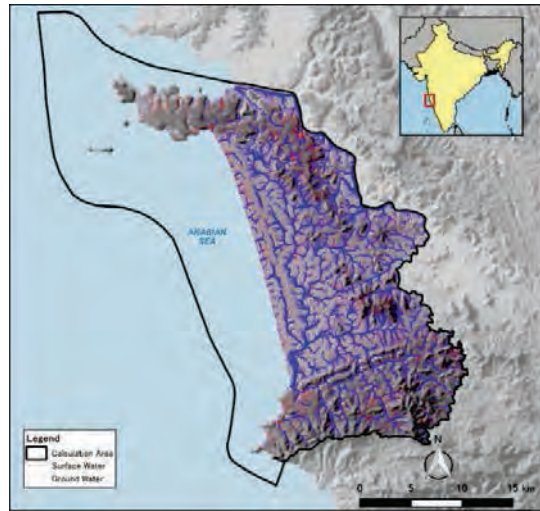
5月 (モンスーン前)



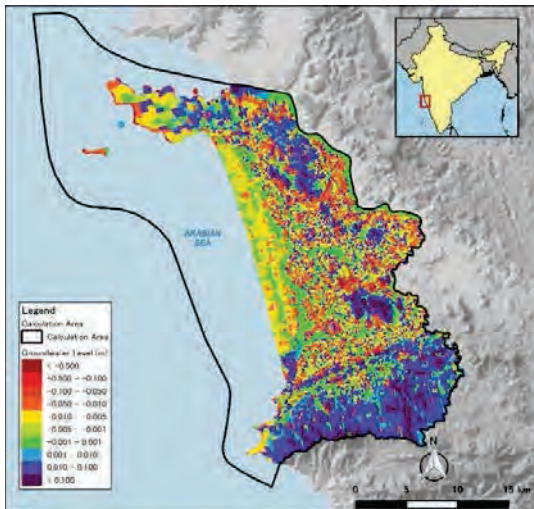
5月 (モンスーン前)



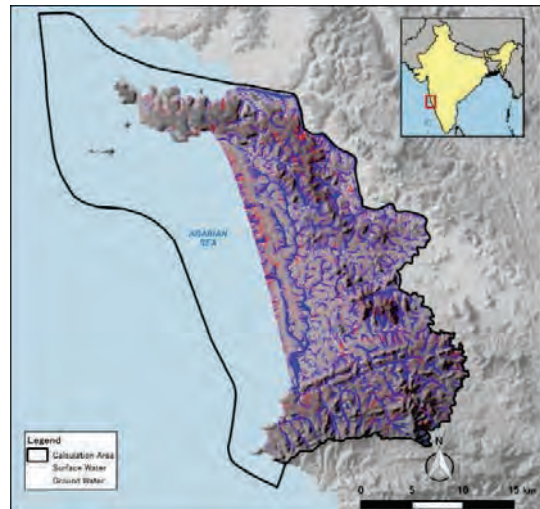
7月 (モンスーン季)



7月 (モンスーン季)



11月 (モンスーン後)



11月 (モンスーン後)

図 9-5 自然状態と農業用揚水を考慮した状態との地下水位の差 (再掲)

図 9-6 第1滞水層を出発点とした粒子追跡解析結果 (再掲)

9.2. 市街地（都市部）への提案

都市部（市街地）として、マーガオ（Margao）付近に着目する。

Margao 地域の水収支集計結果を表 9-1 に再掲する。

表 9-1 Margao 地域の水収支集計結果（モンスーン季および非モンスーン季別）（再掲）

水収支内訳		モンスーン季集計値 (期間：6/1 - 10/31) ($1 \times 10^6 \text{ m}^3$)	非モンスーン季集計値 (期間：11/1 - 5/31) ($1 \times 10^6 \text{ m}^3$)	
流入量	P	降水量	98.5	3.6
	Rin	地表水流入量	110.2	1.4
	Gin	地下水流入量	8.2	0.7
流出量	Es	地表水蒸発散量	12.2	4.3
	Eg	土壌水蒸発散量	4.8	5.8
	Ro	地表水流出量	190.6	2.7
	G	地下水流出量	6.25	0.56
範囲内 諸量	Qre	かん養量	11.5	0.3
	Qsp	湧出量	6.9	1.2
貯留量	ΔSs	地表水貯留量(変化)	1.14	-1.14
	ΔSg	地下水貯留量(変化)	6.12	-6.06

9.2.1. 水利用の視点

非モンスーン季では Margao 地域への地表水の流入量・流出量ともに小さく（表 9-1）、市街地での地表水の流動はほとんど生じておらず（図 9-3）、地下水の流入量・流出量もわずかである（表 9-1）。

また、Margao 周辺では第 1 帯水層を出発点とした地下水は、地下水として流れている経路長は短く、直ちに地表水として近傍の河川域に湧出している（図 9-6）。

人為的な水利用すなわち地下水の揚水を考えていない自然状態の解析によると、モンスーン季（7 月）には、地表面にあった自由地下水位が、徐々に低下し、モンスーン前（5 月）には、GL-8m よりも深い深度になっている。本地域は井戸水の利用が主であることを念頭に置いて、今回の検討で反映されていない市街地における工業用としての地下水利用を考慮した場合には、解析結果における現況の地下水位よりもさらに地下水位が低下すると考えられる。

そのため、モンスーン季に地表面付近で有機物に汚染された雨水が土壤に浸透し、地下水として涵養されたと考えると、汚染された地下水を揚水により地下に引き込んでいる構図となる。

9.2.2. 排水に関する視点

地表水の鉛直方向の涵養形態を示すことより、市街地の河川水および地下水の水質を良好に保つためには、河川の浄化のほかに、地下水の水質を良好に保つことが重要であり、地下水に浸透する汚染物質をできる限り排除することが有効と考えられる。

河川に供給される地下水の流動経路が短いことから（図 9-6）、市街地の汚染の発生源として考えられる工場等から排出される生産活動などに伴う汚染物質の排出とは別に、市民生活に付随する糞尿の処理も重要である。また、都市部は比較的まとまった集落群であることから、浄化槽の整備、集落単位の集落排水設備や都市下水処理施設等の整備が必要である。

河川浄化の方策としては、モンスーン季にしばしば発生する洪水により、地表面を流れる表流水が投棄されたゴミなどを河川域に移動させ、河川環境を劣悪なものにしていることから、不法投棄の阻止対策ならびにゴミの撤去によって、河川環境改善の効果が期待できる。

9.3. 海岸部への提案

海岸部はビーチリゾートとして利用されている。ビーチリゾートに立地するホテル群が利用している地下水では海水の侵入が問題となっている。

9.3.1. 水利用の視点

海岸部の地下水は塩水の侵入が解析からも明らかになっている（図 6-5）。また、海岸部の地下水は年間を通じて陸側から海側に流れていることが確認できた（図 9-6）。モンスーン前（5月）には、海岸砂丘を涵養源として地下水が流れるが、モンスーン季（7月）およびモンスーン後（11月）には海岸砂丘より陸側の地点から地下水が供給されている。

海岸部は地下水利用が主体であることから、今回の計算では考慮していない水量の地下水を大量に揚水していることが考えられる。その場合には、さらに陸側から地下水を引いていることが想定される。地下水の大量揚水が海岸部の塩水の侵入を促進している場合には、ある程度の揚水規制が必要である。

9.3.2. 排水に関する視点

海岸部で利用される井戸の塩害を軽減するためには、陸側から供給される地下水の量を増加させることにより、塩水の遡上を抑え込むことが有効である。地下水の流量確保や水質保全のためには、地下水の涵養地の環境を保全し、地下水涵養量を十分に確保することが重要である。

流跡線の解析結果（図 9-6）によると、海岸部に提供される地下水は海岸砂丘およびその西側に位置する耕作地を涵養源としている。海岸地区では地下水としての流動経路が短いことから、陸側から供給される地下水の水質が、海岸部で利用する地下水の水質に直結することが予想される。よってこの地区の環境を保全し、良好な水質を維持できるような整備を行うことが望ましい。

海岸砂丘上の集落の生活排水の処理は、前節の市街地の都市計画に関する提案と同様に、

市民生活に付随する糞尿の処理施設としての浄化槽の整備、集落単位の集落排水設備や都市下水処理施設等の整備が有効であると考ええる。

9.4. 耕作地の土地利用計画への提案

耕作地帯は、海岸砂丘の西側一帯のほか、サル川下流域では河川周辺に広く分布している。耕作地は、主に水田として利用されているが畑地、疎林、灌木帯が混在している。

9.4.1. 水利用

耕作地で涵養された地下水は短い経路をたどって、周辺の河川に湧出している(図 9-6)。耕作地の自由地下水位は浅いところに位置し(図 6-16)、農業用の灌漑としても利用されている。農業利用による著しい地下水位の低下はシミュレーション結果からは見られない(図 7-1～図 7-3)。解析領域全体で算定した水収支では、解析領域の大部分が農地として土地利用されていることを考えると、地下水揚水量 296 万 t/年に対して、地下水貯留量の年間変化量が 98 万 t/年(図 7-5)増加していることから、現状の地下水利用程度であれば地下水位の低下は見られないと考えられる。

これらのことから、現状の農業用水程度の利用量であれば、地下水量の点からは水循環に与える影響はそれほど大きくないと考えられる。

9.4.2. 排水

サル川両岸に展開する耕作地では、耕作地(水田)に供給された農業用水は、サル川に排水されていると考えられる。したがって、農業排水路を健全な状態に保つことが、サル川の水質保全に貢献すると考えられる。

9.4.3. 耕作地の土壌管理

サル川両岸に展開する耕作地で涵養された地下水は、近傍のサル川河川域に湧出しているため、農業活動に伴う汚染物質が地下水を介してサル川に影響を与えている状況が想定される。

図 3-7 によると、亜鉛、鉛などの金属成分も河川水から検出されている。農業活動に伴う汚染物質としては、肥料に含まれる栄養塩、特に窒素化合物の地下水への浸み出しと、殺虫剤に含まれる鉛が考えられる。これらの環境汚染物質は、モンスーン季の洪水の後、浮遊砂に伴って移動し、サル川に流れ込んでいるのではないかと考えられる。また、耕作地の表層土壌に含まれる有害成分が、地下水を経由してサル川に湧出している可能性も否定できない。したがって、耕作地の表層土壌を流出させないような耕作地の管理、適切な肥料と殺虫剤の「量」の管理などが対応策として考えられる。

9.5. 下水処理場(既存)の水質

現地踏査により、マーガオ郊外の南西部に下水処理場があることがわかった。



図 9-7 現地踏査により判明した下水処理場位置 (Google Map による)



図 9-8 下水処理場の衛星画像 (Google Earth による)

この下水処理場の詳細なデータは入手できていないが、立地位置から推察すると、マーガオ市街地の下水を処理し、サル川に放流しているものと考えられる。この下水処理場の排水によるサル川の水質への影響は、現状では図 9-9 の⑤ (Khareband) と④ (Orlim) の 2

地点を比較する方法しかない。

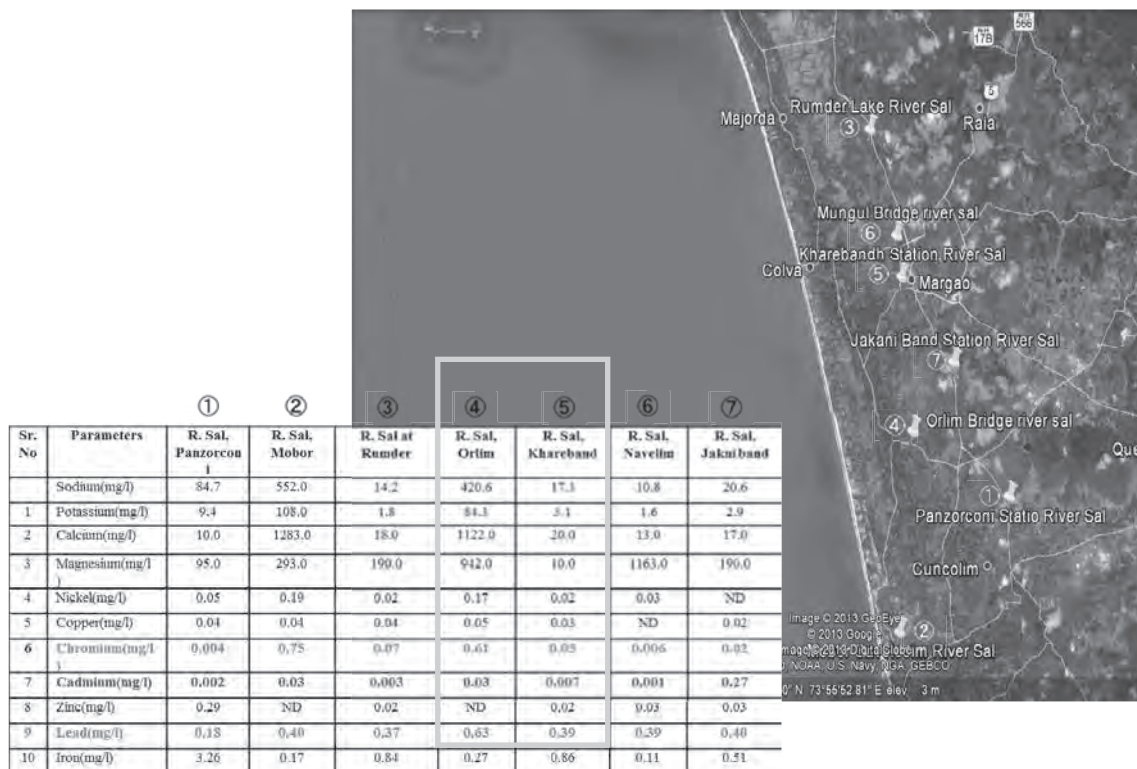


図 9-9 サル川の水質（再掲）

ただし、④はサル川下流部のその他の影響も含まれ、かつ、支川の合流地点より下流にあるため、支川の水質の影響も受けている。

単純には両地点を比較はできないが、下流部に位置する④は、ナトリウム(sodium)、カリウム(potassium)、カルシウム(calcium)、マグネシウム(magnesium)、ニッケル(nickel)、銅(copper)、クロム(chromium)、カドミウム(cadmium)、鉛(lead)の含有量が増加しており、水質が悪化している状態が読み取れる。

9.5.1. 水利用

下水処理場は、市街地よりサル川下流部に位置するため、これより下流区間では、河川両岸は耕作地として利用されている（図 9-10）。サル川の河川水を灌漑に利用している場合には、排水される処理水の水質を健全な状態に保つ必要がある。

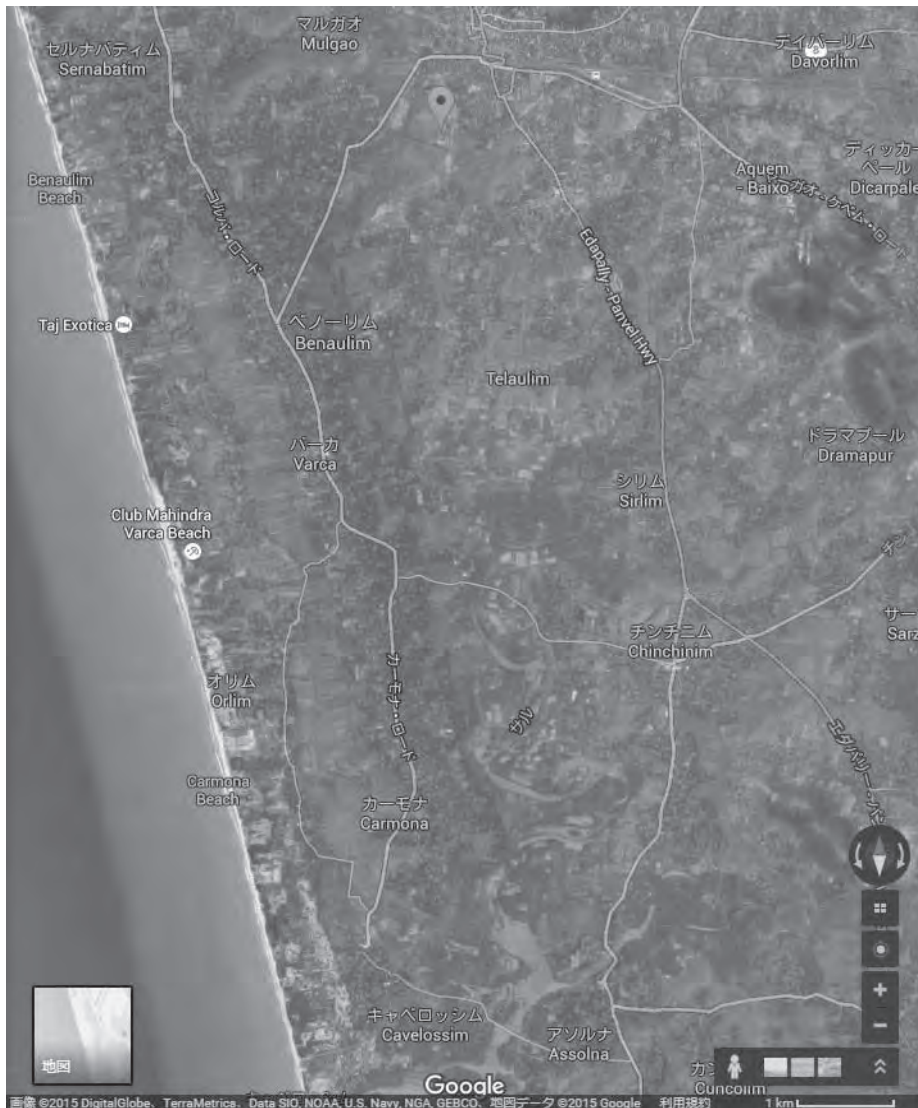


図 9-10 下水処理場より下流域の衛星画像（Google Earthによる）

9.5.2. 水質モニタリングの提案

現状では、下水処理場の処理水を排水することによる影響を客観的に把握するためのモニタリングが十分ではないため、下水処理後の放流水がサル川の水質に与える影響は判断できない。

この下水処理水の放流地点は、サル河流域の観点からは、マーガオ市街地を抜けた位置にあるため、放流地点近傍の上流部と下流部の2点でそれぞれ水質観測を行うことを提案する。ただし、上流部に設置される観測点は、下水処理水の放流の影響を受けない程度離れた地点であることが必要である。これにより、マーガオ市街地を流下することによる汚染の程度と、下水処理水の放流による汚染の程度を把握することができる。