



Station Triangelns hydrogeologiska egenskaper

Analys och jämförelse av förundersökningar och verkligt utfall

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vatten

PETER DAMGAARD

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargrupp Teknisk geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2006
Examensarbete 2007:19

EXAMENSARBETE 2007:19

Station Triangelns hydrogeologiska egenskaper

Analys och jämförelse av förundersökningar och verkligt utfall

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet

PETER DAMGAARD

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargrupp Teknisk geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2006

Station Triangelns hydrogeologiska egenskaper
Analys och jämförelse av förundersökningar och verkligt utfall
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet
PETER DAMGAARD

© PETER DAMGAARD, 2006

Examensarbete 2007:19
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för *geologi och geoteknik*
Forskargrupp *Teknisk geologi*
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Karta över Citytunnelprojektet (Citytunneln)

Chalmers reproservice/Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2006

Hydrological properties of the Triangel station
Evaluation and comparing of preliminary investigations and true outcome
Master Thesis, Building and Civil Engineering
PETER DAMGAARD
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of GeoEngineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

This master thesis has been performed at Citytunneln in Malmö during the period 13 July 2006 to 30 November 2006. The Citytunnel, which is a communication solution that connects the railway north of Malmö with the railway towards Trelleborg, Ystad and Copenhagen, was started in 2005 and is calculated to be finished in 2011. The Citytunnel project includes two parallel, 6-kilometre-long tunnels under central Malmö. 4.5 kilometres of tunnel will be bored and the remaining part will be excavated from ground level – the method is called cut and cover technology.

The purpose of this master thesis is to compare the preliminary investigations with the true outcome and to evaluate which methods best predict the actual conditions. The master thesis is limited to the area around Triangeln station.

A large number of preliminary investigations have been made in the Triangel area to clarify its hydrological properties. Among other things, a number of simulations have been implemented in a Mike She based groundwater model. The predicted pumping yield is 242 m³/h and the true pumping yield is 150m³/h. In the model the re-infiltration is estimated to be approximately 80% of the total pumping yield but in reality the pumping yield has varied during the construction time and infiltration has at times exceeded 100%.

Capacity tests and pumping tests, of the preliminary investigations show quite big differences in estimated transmissivity. These differences are however logical and can be explained by differences in well designs and drilling depth. When the groundwater system was installed pump tests were carried out in all infiltration- and pumping wells. The estimated transmissivity was considerably higher in the infiltration wells than in the pumping wells. The median transmissivity in the pumping wells was $3.7 \cdot 10^{-4}$ m²/s and the median transmissivity in the infiltration wells was $7.4 \cdot 10^{-3}$ m²/s. When plotting specific capacity in relation to estimated transmissivity the infiltration wells almost showed a 1:1 relation. In the pumping wells the transmissivity was considerably larger than the specific capacity. This is probably an indication of a significant skinfactor.

In this master thesis an Excel based groundwater model has been made for Triangeln. The model has been used in order to clarify the significances of the hydrological parameters for the groundwater drawdown. For example the leakage coefficient proved to be very important for the drawdown.

Key words: Preliminary investigations, hydrogeology, transmissivity, groundwater model, pumping test, capacity test, specific capacity, skinfactor

Station Triangelns hydrogeologiska egenskaper
Analys och jämförelse av förundersökningar och verkligt utfall
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet
PETER DAMGAARD
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för *geologi och geoteknik*
Forskargrupp *Teknisk geologi*
Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Detta examensarbete har utförts på Citytunneln i Malmö under perioden 13 juli, 2006 till 30 november, 2006. Citytunneln, som är en kommunikationslösning som knyter ihop järnvägen norr om Malmö med järnvägen mot Trelleborg, Ystad och Köpenhamn, började byggas 2005 och beräknas vara klar 2011. Järnvägsprojektet innefattar två stycken 6 kilometer långa parallella tunnlar under centrala Malmö. 4,5 km tunnel borrar och resterande del utgörs av betongtunnel som schaktas från markytan.

Syftet med detta examensarbete är att jämföra förundersökningarna med de verkliga konstaterande grundvattenförhållandena samt att utvärdera vilka metoder som bäst beskrivit de verkliga förhållandena. Examensarbetet begränsas till området runt station Triangeln.

Ett stort antal förundersökningar har gjorts vid station Triangeln med hänsyn till att klarlägga de hydrologiska egenskaperna i området. Bland annat har ett antal simuleringar genomförts i en Mike She baserad grundvattenmodell. Det modellerade uttaget är 242 m³/h och det verkliga uttaget är 150 m³/h. Återinfiltrationen är i modellen beräknad till cirka 80 % av det totala uttaget men i verkligheten så har återinfiltrationsflödet varierat under byggtiden och har vid tillfällen överskridit 100 % av uttaget. Förundersökningarnas kapacitetstester och propvpumpningar visar ganska stora skillnader i beräknad transmissivitet. Dessa skillnader är dock logiska och går att förklara med skillnader i brunnsutföranden och borrhållsdjup.

I samband med att grundvattensystemet installerades vid station Triangeln propvpumpades samtliga uttags- och infiltrationsbrunnar. Det visade sig att de beräknade transmissiviteterna var betydligt större i infiltrationsbrunnarna än i uttagsbrunnarna. Utagsbrunnarnas mediantransmissivitet var $3.7 \cdot 10^{-4}$ m²/s och infiltrationsbrunnarnas mediantransmissivitet var $7.4 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Vid plottning av specifik kapacitet i relation till beräknad transmissivitet var förhållandet i princip 1:1 för infiltrationsbrunnarna. I uttagsbrunnarna var transmissiviteten betydligt större än den specifika kapaciteten vilket kan vara ett tecken på en betydande skinfaktor.

I samband med examensarbetet har en Excelbaserad grundvattenmodell byggts upp för Triangeln. Modellen har använts för att klargöra de hydrologiska parametrarnas betydelse för grundvattenavsänkning. Exempelvis så visade det sig att läckagekoefficienten har stor betydelse för grundvattenavsänkning.

Nyckelord: Förundersökningar, hydrogeologi, transmissivitet, grundvattenmodell, propvpumpning, kapacitetstest, specifik kapacitet, skinfaktor

Innehåll

ABSTRACT	I
SAMMANFATTNING	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	VI
HANDLEDARENS FÖRORD	VI
BETECKNINGAR	VII
INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Problembeskrivning	2
1.3 Syfte och mål	2
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Metod	2
2 FÖRUNDERSÖKNINGAR	3
2.1 Inledande undersökningar	3
2.2 Borrhålstester	3
2.2.1 Kärnborrning	3
2.2.2 Kärnloggning	4
2.2.3 Jord- och bergsondering	4
2.2.4 Hammarborrning	4
2.2.5 Air lift capacity	5
2.2.6 MWD	5
2.2.7 Kapacitetstest	6
2.2.8 Flödesloggning	6
2.2.9 Provpumpning	7
2.3 Geofysiska undersökningar	8
2.3.1 Seismik	8
2.3.2 Geofysisk loggning	9
2.4 Övervakning av grundvattennivåer	10
3 GEOLOGISKBESKRIVNING	11
3.1 Berggrundsbeskrivning	11
3.2 Berggrundens lagerenheter	12
3.3 Station Triangelns lokala berggrundsbeskrivning	13
3.4 Jordartsbeskrivning	14
3.5 Jordarternas lagerenheter	15
3.6 Station Triangelns lokala jordartsbeskrivning	15

4	ALLMÄNT OM GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN	16
4.1	Grundvattenbildning	16
4.2	Grundvatten i jord- och berg	17
4.2.1	Akviferer och barriärer	17
4.3	Grundvattenströmning	18
4.4	Hydrauliska egenskaper	18
4.4.1	Hydraulisk konduktivitet och hydraulisk gradient	18
4.4.2	Transmissivitet	18
4.4.3	Läckagekoefficient	19
4.5	Utvärderingsmetoder vid provpumpning	19
4.5.1	Approximativ metod med skinfaktor	19
4.5.2	Utvärdering av skinfaktor	20
4.6	Naturliga variationer	21
4.7	Grundvattensänkning till följd av byggande i berg	21
4.8	Metoder för att minska grundvattensänkning	22
4.8.1	Injektering	22
4.8.2	Infiltration	23
5	GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN LÄNGS CITYTUNNELN	24
5.1	Förväntad förändring av grundvattennivåer till följd av Citytunnel	25
5.2	Hydrogeologiska förhållanden vid station Triangeln	25
5.3	Utförda förundersökningar vid station Triangeln	26
6	GRUNDVATTENMODELLERING	27
6.1	Allmän beskrivning	27
6.2	Station Triangelns lokala konstruktionsmodell	29
7	TRIANGELNS GRUNDVATTENSYSTEM	30
8	FÖRUNDERSÖKNINGSRESULTAT	32
8.1	Borrkampanj år 1998-1999	32
8.1.1	Kapacitetstest	32
8.1.2	Provpumpning	33
8.2	Kompletterande borrhningar år 2001-2002	34
8.2.1	Kapacitetstest	35
8.2.2	Provpumpning	36
8.3	Grundvattenmodelleringsresultat	36
9	KONSTATERANDE GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN	37
9.1	Provpumpning av uttags- och infiltrationsbrunnar	37
9.2	Grundvattensystemets uppmätta flöden	40

10	EXCELBASERAD MODELL	42
10.1	Modelluppbyggnad	42
10.2	Känslighetsanalys	43
11	JÄMFÖRELSE AV FÖRUNDERSÖKNINGSRESULTAT OCH VERKLIGT UTFALL	45
11.1	Hydrauliska egenskaper	45
11.2	Uttags- och infiltrationsflöden	46
12	DISKUSSION OCH SLUTSATS	47
12.1	Uttags- och infiltrationsflöden	47
12.2	Hydrauliska egenskaper	47
12.3	Excelbaserad modell	50
12.4	Rekommendationer	51
13	REFERENSER	52
14	BILAGEFÖRTECKNING	54

Förord

Detta examensarbete inom civilingenjörsprogrammet väg- och vatten omfattar 20 p och har utförts vid Citytunneln i Malmö. Examensarbetets målsättning är att öka kunskapen om hur förundersökningar korrelerar med utfall med avseende på grundvattenförhållanden vid tunnelbyggen.

Jag vill tacka min examinerare Gunnar Gustafson, professor vid Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, för alla tips och råd.

Tack all personal på Citytunneln som har bidragit med resurser, tid och ett gott bemötande. Utan er hjälp hade inte detta examensarbete kunnat genomföras. Ett särskilt tack vill jag rikta till Johan Brantmark och Gösta Ericson som har varit mina handledare på Citytunneln. Jag vill även tacka Christopher Kolbjörnsen och Daniel Sevelin som hjälpt mig med information om Citytunnelns förundersökningar.

Ett stort tack också till Per Laursen på Malmö Citytunnel Group som har ställt upp med all möjlig information om Triangelns grundvattensystem.

Malmö, December 2006

Peter Damgaard

Handledarens förord

Följande examensarbete utgör en analys av skillnader mellan förutsägelser om grundvattenförhållandena vid byggandet av Station Triangeln vid Citytunneln i Malmö och situationen under byggtiden. Grundvattenprognosen grundades på förundersökningarna och de åtgärder för att skydda grundvattennivån som då förutsågs. I verkligheten byggdes ett något annorlunda system av pump- och infiltrationsbrunnar som tillsammans med injekteringen kring schakten gett en mera gynnsam grundvattensituation. Peter Damgaard har gjort en omfattande och mycket bra analys av de resulterande förhållanden och orsakerna till skillnaderna. Han har också genomfört en grundvattenmodellering som klart visar varför och hur systemet fungerar. Ett väl genomfört examensarbete som bör vara till nytta för Citytunneln.

Göteborg 2007-03-20

Gunnar Gustafson
Professor

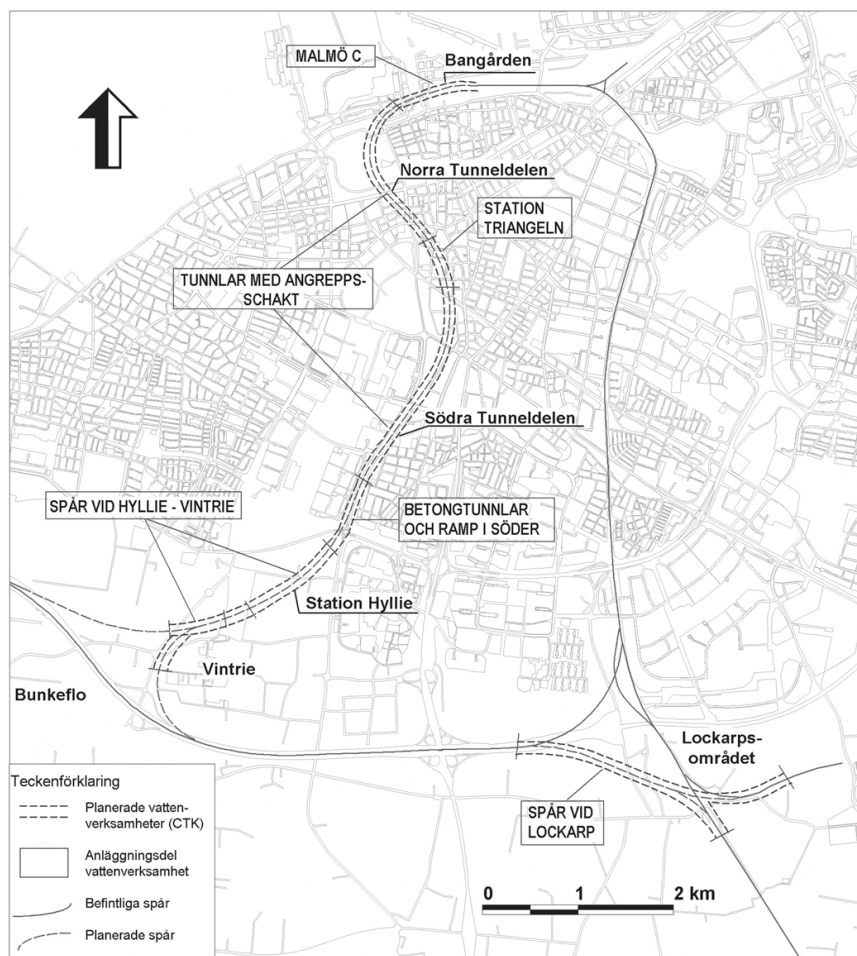
Beteckningar

B	Läckagefaktor (m)
b	Lagerenhetens tjocklek (m)
h_0, h_1, h_2, h_3, h_4	Grundvattennivå i Excelmodell (m)
I	Hydraulisk gradient (-)
K	Hydraulisk konduktivitet (m^2/s)
K'/b'	Läckagekoefficient ($1/\text{s}$)
Q	Flöde (m^3/h)
r	Brunnsradie (m)
R_0	Integrationskonstant i brunnsekvation (influensradie) (m)
s_w (uppmätt)	Uppmätt avsänkning (m)
s_w	Beräknad avsänkning (m)
S	Magasinskoefficient (-)
T	Transmissivitet (m^2/s)
$(\Delta = \Delta x = \Delta y)$	Cellstorlek i Excelmodell (m)
ξ	Skinfaktor (-)
κ	Ett mått på avvikelsen mellan specifik kapacitet och transmissivitet (-)

Inledning

1.1 Bakgrund

Citytunneln är en kommunikationslösning som knyter ihop järnvägen norr om Malmö med järnvägen mot Trelleborg, Ystad och Köpenhamn. Citytunneln innefattar två stycken 6 kilometer långa parallella tunnlar under centrala Malmö. 4,5 km tunnel ska borrar och resterande del utgörs av betongtunnel som schaktas från markytan. För att kunna genomföra anläggningsarbetena krävs en avsänkning av grundvattnets trycknivå under byggskedet. För att begränsa påverkan på grundvattennivåerna kommer huvuddelen av det uppumpade vattnet att återinfiltreras till akviferen i kalkberget. Anläggningarna under mark kommer i driftskedet i princip att vara helt täta. För att få fram ett bra underlag har Citytunnelprojektet genomfört omfattande förundersökningar. Det rör sig om propumpningar, analyser av jord- och vattenprover samt långtidsövervakning av grundvattennivåerna längs Citytunnelns sträckning. Resultaten från alla förundersökningar och utredningar finns samlade i en databas. I databasen registreras även all bakgrundsinformation som samlats in, som grundvattennivåer, vibrationer i byggnader och dammspridning.



Figur 1.1 Karta över Citytunnelprojektet (Citytunnelprojektet [11])

1.2 Problembeskrivning

1.3 Syfte och mål

Syftet med detta examensarbete är att analysera och jämföra Citytunnelns förundersökningar med de verkliga konstaterande grundvattenförhållandena. Ett viktigt syfte är också att man ska kunna använda denna rapports resultat för att bättre kunna utvärdera verkliga förhållanden i kommande undersökningar för tunneldriften.

Examensarbetets mål är att öka kunskapen om hur förundersökningar korrelerar med utfall med avseende på grundvattenförhållanden vid tunnelbygge.

1.4 Avgränsningar

För att beskriva tunnelprojektet kan man dela upp Citytunneln i olika delar; Malmö Central, tunneldelen mellan Malmö C och Holma, station Triangeln, järnvägen vid Holma och Hyllie, stationen Hyllie och förbindelsespåren i Lockarp. Examensarbetet begränsas till området runt station Triangeln. Efter en inledande diskussion formulerades följande frågor;

1. Vilken/vilka av de använda undersökningsmetoderna har bäst predikterat de konstaterade grundvattenförhållandena vid station Triangeln?
2. Hur ser korrelationen ut mellan de olika metoderna med avseende på de dominerande geohydrologiska zonerna i kalkstenen?
3. Vilken/vilka undersökningsmetoder skulle man, med stöd i de två frågorna ovan, lämpligast välja för att prediktera signifikanta geohydrologiska partier i kalkstenen framför TBM vid tunneldrivningen?
4. Vad innebär de ovanstående frågorna med hänsyn till val av modellerings-verktyg?
5. Hur utförs grundvattensänkningen vid byggandet av station Triangeln och hur skiljer sig utförandet mot det tänkta. Om det finns en skillnad hur påverkas då de beräknade prognoserna.

1.5 Metod

Undersökningsmaterialet som används i detta examensarbete finns samlat i Citytunnelns databas och arkiv.

- Examensarbetet inledas med en litteraturstudie om de olika undersökningsmetoderna.
- En beskrivning av Malmös regionala och lokala geologi med underlag från databasen har gjorts.
- Sedan görs en sammanställning och analys av förundersökningarna.
- Tyngdpunkten för examensarbetet är jämförelsen och analysen av resultaten från förundersökningarna och de verkliga konstaterade grundvattenförhållandena i området runt station Triangeln.
- På grundval av jämförelsen utförs en analys av orsaken bakom skillnaderna mellan prognos och utfall.

2 Förundersökningar

Det huvudsakliga syftet med förundersökningar är att öka kunskapen om förutsättningarna för den planerade anläggningen. Följande kapitel behandlar vanligt förekommande undersökningsmetoder vid tunnelbyggen.

2.1 Inledande undersökningar

Förundersökningar inleds ofta med skrivbordsstudier för att identifiera olika problemområden. Det handlar för det mesta om att man sammanställer vad som redan är känt från tidigare genomförda undersökningar såsom förundersökningsdata från avslutade berganläggningsprojekt i området.

I ett inledande skede genomförs ofta en kartstudie. Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) tillhandahåller ett antal olika typer av kartmaterial med information om exempelvis ett områdes jordarter, bergarter, tektonik, hydrologi etc.

Nästa steg i undersökningsprocessen är att på plats genomföra en okulär besiktning av området där den planerade anläggningen skall byggas.

Genom att sammanställa de inledande undersökningarna fås en första bedömning om projektets lämplighet samt ett planeringsunderlag för kommande förundersökningar.

2.2 Borrhålstester

Provtagning och annan dokumentation av jord- och berglager med hjälp av borrhning utgör en av de viktigaste fältundersökningsmetoderna för att få en bild av ett områdes geologiska uppbyggnad. Varje borrhål som görs genom jord och berg tillför en ny ledtråd till beskrivningen av den geologiska uppbyggnaden.

Den borrh tekniska utvecklingen har anor långt bak i tiden. Redan i antiken behärskade man tekniken att borra eller gräva brunnar. Bland annat utvecklades Linstötmetoden i Kina ett par hundra år före Kristi födelse. I takt med väst världens industrialisering har borrhningsmetoderna utvecklats och anpassats till olika branscher. Av dessa är oljeindustrin, sten- och gruvindustrin, brunnsborrningsbranschen samt det geotekniska området de mest framträdande (Andersson [1]).

2.2.1 Kärnborrhning

Den vanligaste formen av undersökningsborrn timer i berg är kärnborrhning med diamantkrona, ibland kallad ”diamantborrn timer”. Den skär kontinuerlig ut en kärna ur berget, vilket tränger in i en inre kärncylinder i borrhverkyget. Spolvätskan som används vid borrhningen strömmar genom kanaler i borrhkronan och vätskan med lossbrutna bergfragment passerar uppåt i utrymmet mellan kärncylindern och verkygets ytterrör. Den bergkärna som skärts ut ur berget kan analyseras så snart den har tagits ut ur kärnröret (Lindblom [21])

2.2.2 Kärnloggning

En analys av bergkärnan från en kärnborrning kallas kärnloggning. Så snart kärnan tagits ut ur kärnröret placeras kärnan systematiskt i kärnlådor som innehåller en noggrann bestämd längd bergkärna i vart och ett av ett antal parallella fack. Vid kärnloggning bör bergartstyp, bergkvalitet, svaghetszoner, vittringsgrad och sprickegenskaper så som sprickavstånd, sprickytornas råhet, sprickorientering och sprickfrekvens dokumenteras. Så snart en kärnlåda är komplett och innan uttorkning hunnit ske skall lådan färgfotograferas för senare studier. Figur 2.1 nedan visar en kalkstensborrkärna som togs i samband med Citytunnels förundersökningar.



Figur 2.1 *Kalkstensborrkärna som togs i samband med Citytunnels förundersökningar*

2.2.3 Jord- och bergsondering

En gammal metod som har utvecklats ytterligare de senaste åren är jord- och bergsondering (Jb-sondering). Med Jb-sondering avses normalt sondering i jord och berg med trycklufts- eller hydrauldrivna bormaskiner med borrstänger och bergborkronor.

Målet med Jb-sondering är information inte kapacitet. Genom att kontinuerligt registrera parametrar som borrhuvud, matningskraft, vridmoment, rotationshastighet, spoltryck, spolförluster, kronslitage m.m. kan man få en uppfattning om bergets kvalitet.

2.2.4 Hammarborrning

Kärnborrning är en förhållandevis dyr undersökningsmetod och ett sätt att hålla ner kostnaden kan vara att ersätta några kärnborrhål med hammarborrhål. Enligt Andersson [1] sker hammarborrning enligt två grundprinciper. Den äldsta av dessa är när det slående momentet finns inbyggt i borrhuvudet vilket kallas topphammare. Det andra alternativet är en nere-i-hålet-motor som alstrar slagrörelser, denna metod kallas sänkhammare.

Hammarborkronorna är av två typer. Antingen är de utformade med skärande egg, skärkrona, eller också med stift, stiftkrona. Både skär och stift består av hårdmetall av olika kvalitet, ju hårdare bergart som ska borraras, desto slitstarkare legering krävs. Vid borringen alstras stötvågor med hög frekvens från topp- eller sänkhammaren som drivs av tryckluft. Borren roterar en viss vinkel mellan varje stötvåg. Det roterande momentet är i första hand till för att få borkronan att träffa en ny yta för varje slag. För att transportera borkaxet upp ur hålet med luft fodras en hög spolfastighet.

Ibland kan stora kaxfragment bildas bland annat till följd av ett redan sprickigt berg. Genom att lyfta krona och hammare så att slagverket stoppar rusar all luft genom hammaren, vilket ger en väsentligt ökad spolluftsmängd och därmed också en rensblåsningseffekt (Andersson, [1]).

Hammarbörning kan ge information om borrarjunkning, matningskraft, vridmoment, rotationshastighet, spoltryck, spolförluster, kronslitage mm. En faktor som inverkar på borrarjunkningen är grundvattentillströmningen till borrhålet under borringens gång. I princip gäller att ju mer vatten som flödar in i borrhålet ju större del av arbetstrycket går åt att lyfta vattnet ur hålet.

2.2.5 Air lift capacity

Metoden bygger på att vatten kan tränga in i borrhålet under borringen då man borrar med tryckluft. Genom att mäta vattenflödet ur borrhålet kan man få en uppfattning om en sektioners permeabilitet. Ett ökat flöde är en indikation på en ökad permeabilitet hos den borrhade sektionen. Utvärderingsmetoden kan baseras på följande antaganden enligt Citytunnelprojektet [34]:

- Vattentrycket i det borrhade berget är högre än mottrycket i borrhålet. Detta gör att grundvatten kan tränga ut i borrhålet för att sedan ”lyftas upp” ur hålet.
- En plötslig ökning av flödet indikerar att en högpermeabel zon har trängts igenom, troligtvis en spricka eller sprickzon i berget.
- Ett kontinuerligt och långsamt ökande flöde ur hålet indikerar en jämn fördelad permeabilitet över den genomträngda sektionen, som bara kan påverkas med en gradvis avsänkning mot djupet.
- En längre sektion med ökat flöde ur hålet, som inte kan förklaras med en gradvis avsänkning mot djupet, indikerar en högre permeabilitet i den zonen. Detta kan relateras till en högre primär porositet eller en mindre sprickzon.

Det finns en mängd olika orsaker som kan göra att undersökningsmetoden är osäker. Citytunnelprojektet [34] listar följande orsaker:

- Ökat tryck i borrhålet till följd av någon sorts blockering i systemets utlopp. Detta innebär ett minskat flöde.
- Olika lufttryck för olika sektioner av borrhålet orsakat av bormaskinen.
- Igensättning av sprickor eller bergets porer vilket förekommer främst i den övre delen av borrhålet.

2.2.6 MWD

I takt med att tekniken har gått framåt så har metoder utvecklats och numera finns datoriserade registreringsutrustningar fastmonterade på borrarbandvagnar. Detta gör att mätningar kan utföras under borringens gång, så kallad MWD (Measurement While Drilling). Att det finns ett samband mellan bergmassan och borrarbarheten är allmänt känt. MWD-tekniken utnyttjar detta samband till att bestämma bergmassans egenskaper. Under borringen mäts och registreras parametrar som kontrollerar borrarprocessen.

Enligt Lindén [22] kan borrarparametrarna delas upp i två grupper, oberoende parametrar som kan varieras av operatören samt beroende parametrar som är responsen från bergmassan.

Exempel på oberoende parametrar:

- matningskraft [kN]
- rotationshastighet [rpm]
- spolmedieflöde [l/min]

Exempel på beroende parametrar:

- borrarjunkning [cm/min]
- vridmoment [bar]
- spolmedietryck [bar]

En utvärdering av de hydrogeologiska förhållandena så som inflödes zoner kan göras med hjälp av MWD-grafer från tryckluftsdrivna hammarborrningar. Utvärderingsmetoden är baserad på att då vatten tränger in i borrhålet måste matningskraften (arbetstrycket) ökas för att man ska behålla en viss borrarjunkning. Om inte matningskraften ökas kommer borrarjunkningen minska eftersom borraringskapaciteten minskar på grund av det höjda energibehovet för att få bort det inträngda vattnet.

Vridmomentet, i kombination med rotationshastigheten och trycket på borkronan, kan vara en indikator på tillflöde av grundvatten och ett ”hackigt” vridmoment är ofta ett tecken på sprickighet. Tillflödet av vatten har en smörjande effekt på borren vilket medför en minskad friktion. Beroende på hur borrariggens hydrauliska system är utformat kan detta medföra en ökad borrarjunkning

MWD data kan anses som ett relativt osäkert analysmaterial, speciellt då förekomsten av vatten i bergmassan är högt. Men i kombination av resultat från andra undersökningsmetoder som geofysiska loggningar, flödesloggningar m.m. kan MWD data vara en stark hydrogeologisk indikator.

2.2.7 Kapacitetstest

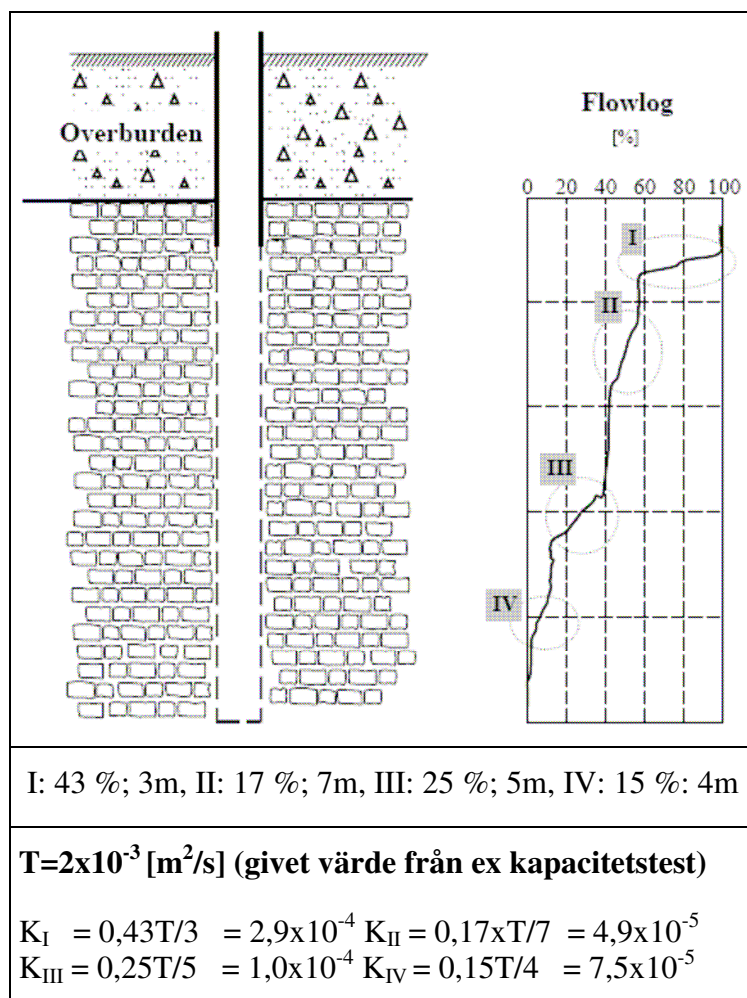
Genom att pump testa borrhål och registrera avsänkningen i förhållande till tiden och pumpflöde kan hydrauliska egenskaper utvärderas. Exempelvis kan transmissiviteten beräknas med hjälp av Cooper-Jacobs metod om avsänkingsdata visar en distinkt linjär trend i ett semilogaritmiskt diagram. Cooper-Jacobs metod finns beskriven i de flesta böcker som behandlar hydrogeologi, exempelvis Carlsson och Gustafsson [15]. Ekvationen för beräkning av transmissivitet med Cooper-Jacobs metod kan ses nedan;

$$T = \frac{Q \ln(t_2 / t_1)}{4\pi \Delta s_w} \quad (1)$$

2.2.8 Flödesloggning

Om man känner till ett borrhåls inflödesfördelning och transmissiviteten för hela borrhålet kan akviferen delas in i olika zoner med olika hydrauliska egenskaper.

Flödesloggningskurvor används för att identifiera större inflödessektioner längs ett borrhål. Om loggkurvan är vertikal sker det inget flöde från formationen men om loggkurvan visar en jämn lutning betyder det att vatten flödar inom det intervall där kurvan lutar. Ett hopp i kurvan är en indikation på ett koncentrerat vatten in-/utflöde, t.ex. en sprickzon. Ett vanligt sätt att utföra flödesloggning är att sänka ner en propeller som är kalibrerad att mäta flödes hastigheten i m/s. Flödesloggsdata kan eventuellt också kompenseras för avvikande borrhålsdiameter. Figur 2.2 nedan visar ett exempel på hur man kan använda sig av flödesloggning för att bestämma hydrauliska egenskaper längs ett borrhål.



Figur 2.2 Huvudprincipen för beräkning av hydraulisk konduktivitet med hjälp av flödesloggning (Citytunnelprojektet [14])

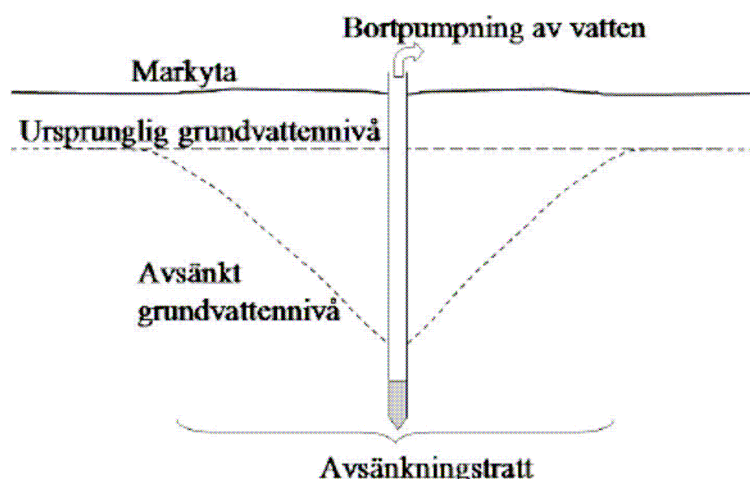
2.2.9 Provpumpning

Provpumpning utförs först och främst för att studera och bestämma magasinets hydrauliska egenskaper och begränsningar. Genom att pumpa bort vatten från en eller flera brunnar i en akvifer kan dens egenskaper bestämmas. Vid provpumpning (kontrollerad störning) pumpas vatten bort konstant eller varierar enligt känt mönster samtidigt som grundvattennivån registreras i närliggande observations rör. Förutom grundvattennivåförändringarna registreras också pumpkapaciteten. Förändringen av grundvattennivån registreras som en funktion av tiden.

Vid pumpning kan grundvattennivån i anslutning till brunnen liknas med en tratt med spetsen nedåt i brunnen. Vid fortsatt pumpning kommer trattens expansion att fortskrida ända tills det råder jämvikt mellan tillströmmat grundvatten till brunnen från akviferen och pumpningskapaciteten. Influenstradien som är benämningen på avståndet från centrum av den pumpade brunnen tills där avsänkningen är noll ökar alltså tills att ett stationärt tillstånd råder (Singhal och Gupta [30]).

I en ideal enhetlig, isotrop och homogen akvifer kommer avsänkningstratten runt den pumpande brunnen att vara symmetrisk och cirkulär. Vanligtvis är en akvifer anisotrop med en varierande mängd krosszoner och sprickor. Avsänkningstratten kommer då att vara oregelbunden och trattens utseende är beroende av hur sprickorna i berget är orienterade. Principen är alltså att avsänkningen följer de goda vattenledarna i berget (Axelsson [3]).

Provpumpningens varaktighet varierar beroende på vilken typ av akvifer som provpumpas och vilken avsikt man har med provpumpningen. Vanligtvis pumpas man tills vattennivån är stabil så att man vid beräkning av akviferens parametrar både kan ta hänsyn till stationära och icke stationära (transienta) analysmetoder.



Figur 2.3 Avsänkningstratt till följd av bortpumpat vatten [19]

2.3 Geofysiska undersökningar

Enligt Singhal [30] är geofysiska undersökningsmetoder en nödvändighet för att förvissa sig om ett områdes geologiska och hydrogeologiska egenskaper. Användningen av geofysik vid hydrogeologiska undersökningar är först och främst för att få övergripande, kvalitativ mätning som ger upplysningar om förändringar av bergförhållandena mot djupet såsom sprickor och krosszoner.

2.3.1 Seismik

Enligt Lindblom [21] används seismik i bergbyggnadssammanhang för att:

- bestämma bergytan i jordtäckt terräng
- ange läget på svaghetszoner i berget
- bedöma utbredning av dåligt berg

Seismiska metoder är baserade på att olika berg- och jordtyper har olika elastiska egenskaper, vilket resulterar i att ljud och tryckvågor (seismiska vågor) fortplantar sig olika. Vågorna genereras av varierande energikällor, ofta någon typ av explosion såsom ett pistolskott eller en tung slägga. Vågor från energikällan fortplantas i marken som elastiska vågor och träffar geofoner som är placerade på varierande avstånd från energikällan. Tryckvågen går snabbast och är av störst intresse vid seismiska mätningar. När geofonerna träffas av en vågrörelse kommer de i svängning och alstrar en elektrisk signal. Dessa förstärks i ett instrument och återges i ett grafiskt diagram, så kallat seismogram, som alltså ger en bild av svängningarna i geofonerna. Metoden kallas refraktionsseismik och bygger på att tryckvågens utbredningsriktning bryts i en skiktgräns (Lindblom [21]).

2.3.2 Geofysisk loggning

Geofysiskloggning erhålls genom att ett mätinstrument sänks ner i ett borrhål. Mätinstrumentet studerar fysiska egenskaper och variationer i berget och deras storlek. Exempel på geofysiskloggning som används inom Citytunnelprojektet är följande:

Gammalogg

Gammastrålning strålas ut från alla naturliga bergarter som ett resultat av en slumpmässigt sönderfall av radioaktiva grundämnen. Grundämnen som producerar gammastrålning är kalium, uran och torium. Loggen registrerar den totala mängden gammastrålning. Dessa grundämnen är koncentrerade i fintfördelade material (lera, silt) där de absorberas av mineraler såsom lera. Detta gör att gammaloggning kan betraktas som en lerindikator [30].

Caliperlogg

Vid caliperloggning mäts diametern av ett borrhål som en funktion av djupet. Mätningen utförs med ett mätinstrument med tre eller fyra armar som elektroniskt öppnar sig i botten av borrhålet. Variationerna i borrhålets diameter mäts då instrumentet vinschas upp till markytan. Kross- och sprickzoner visar ofta en ökad borrhålsstorlek. Detta kan förklaras med att borrhållsvägen kan ha brutits sönder vid borrhållning av dessa zoner (Singhal och Gupta [30]).

Resistivetslogg

Den elektriska ledningsförmågan (konduktivitet) är låg i de flesta mineraler. Variationer i ett bergs ledningsförmåga beror ofta av bergets innehåll av vatten och inte av berget i sig. En zon med noterbart lägre resistans än det omgivande berget kan vara en indikation på att det är en vattenförande zon [4].

Porositetslogg

Porositetsloggar inkluderar också densitet-, neutron- och sonicloggar (ljudvågor). Dessa loggar är kapabla att upptäcka sprickor och utvärdera den sekundära porositeten [30].

Densitetsloggen är en gamma-gamma strålningslogg. En gammastråle sänds ut ifrån en källa och den reflekterande strålens intensitet registreras i ett mätningssystem. Den reflekterande strålens intensitet är relaterat till bergets densitet. En lägre gamma-gamma intensitet innebär en högre densitet [30].

Neutron loggen svarar först och främst på mängden väte i formationen. En avvikelse i neutron loggen innebär ofta att man har att göra med en öppen vattenfylld spricka i berget [30].

Ljudvågsloggningen bygger på att man mäter ljudvågornas amplituder, hastigheter och försvagningar vilket kan ge en indikation om ett bergs sprickorientering [30].

2.4 Övervakning av grundvattennivåer

Vid stora anläggningsprojekt krävs det att man noggrant övervakar grundvattennivåer i anläggningens närhet. Mätningar av grundvattennivå, ytvattennivå, samt lufttrycksmätningar görs ofta i ett antal observationspunkter längs med den planerade anläggningen. Insamling av mätdata görs, antingen manuellt eller automatiskt, kontinuerligt under såväl byggskedet som driftskedet men också innan byggstart. Nivåmätningarna bör göras dels för att kunna kontrollera att nivåerna ligger inom miljödomstolens fastlagda gränser men också av byggnadstekniska skäl. Exempel på byggnadstekniska skäl kan vara att säkerhetsställa att schaktarbeten kan genomföras utan stabilitetsproblem, samt för bedömning av sättningsrisker.

3 Geologiskbeskrivning

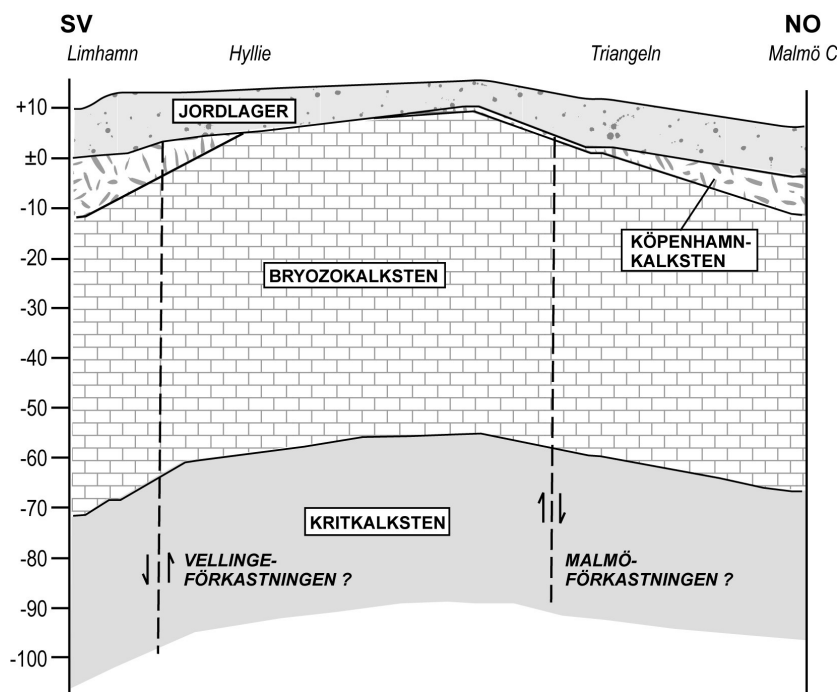
Följande kapitel baseras främst på Citytunnelns egna geologiska undersökningar [12] och på rapporten ”Malmös grundvatten” [29].

3.1 Berggrundsbeskrivning

Malmöregionen ligger inom den sk Dansk-Polska Sänkan, en depression i urberget, som är utfyllt med sedimentära berglager. Topografin i Malmös västra och mellersta delar är förhållandevis flack där markytan stiger i genomsnitt 5 m/km från Öresund svagt upp mot öster och söder till en nivå på ungefär 35 m ö h. I kommunens östra delar är topografin mer kuperad med höjder upp till över 50 meter.

De sedimentära berglagren i regionen, som bildades för cirka 65 miljoner år sedan, är från den tertiära tidsepoken och har en mäktighet på cirka 2000 meter. Berggrunden utgörs av kalksten som är en bergart som till största delen utgörs av mineralet kalcit. Den övre delen av kalkberget, som är 60-80 meter mäktigt, består till övervägande del av fragment från korallrevbildande mikroorganismer.

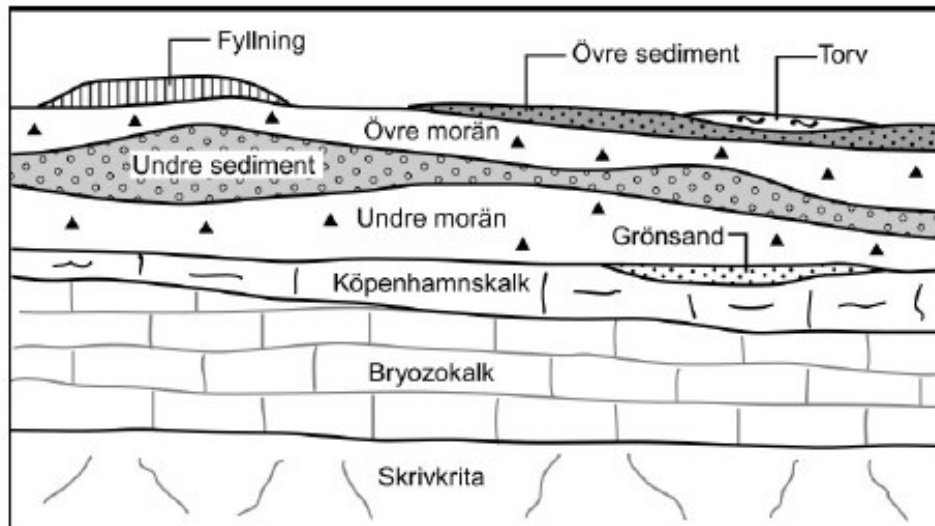
I regionen finns det ett flertal vertikala förkastningar vilket kan definieras som en sprickzon längs vilken förskjutningar har ägt rum. Dessa förkastningar kan påverka förutsättningarna för schaktning och tunnelborrning i kalkberget. Exempel på förkastningar i området är Vellinge- och Malmöförkastningarna som kan ses i figur 3.1 nedan.



Figur 3.1 Kalkstensformationerna längs en linje mellan Limhamns kalkbrott och Malmö Central visar exempel på förkastningar (Citytunnelprojektet [12])

3.2 Berggrundens lagerenheter

Man kan dela in regionens berggrund i följande fyra lagerenheter: Grönsand, Köpenhamnskalksten, Bryozokalksen och skrivkrita, se figur 3.2 nedan.



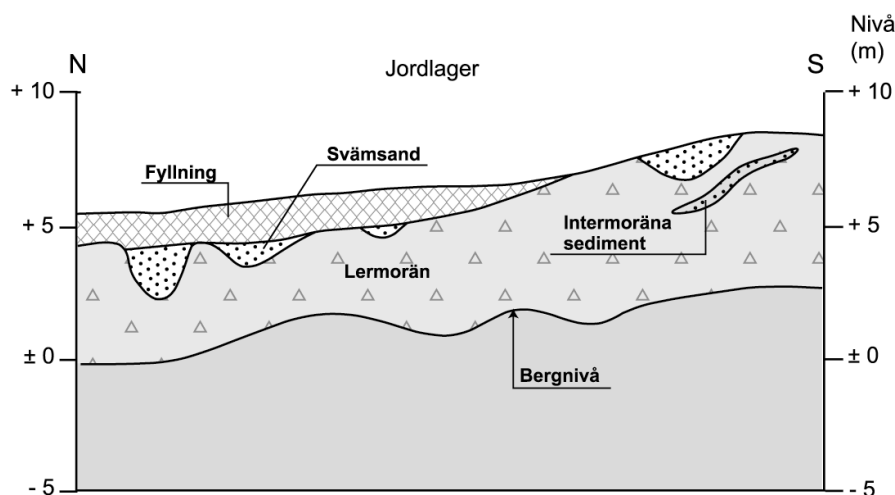
Figur 3.2 Principfigur över geologiska lagerenheter i berggrund och jordlager [29]

- **Skrivkrita** - Skrivkritan består av flera hundra meter mäktiga kalkslamstenar från yngre Krita.
- **Bryozokalksten** - Bryozokalkstenen har fått sitt namn på grund av att kalkstenen till övervägande del är uppbyggd av bryozoer (bryozo = mossdjur). Bryozokalkstenen är lagrad i bankar där bankarna i sig är uppbyggda av lager med varierande hårdhetsgrad (calcitcement), och med varierande innehåll av bryozoer i de olika delarna av bankarna. Mellan Bryozobankarna kan det förekomma korallkalksten som är en mycket hård och massiv kalksten utan flinta. Lokalt kan korallkalkstenen vara mycket porös och vatten-genomsläpplig.
- **Köpenhamnskalksten** - Kalkberget har till följd av växlande bildnings-förutsättningar starkt varierande hårdhetsgrad. De hårdaste lagren består av flinta. I Köpenhamnskalkstenen kan flintan förekomma i upptill metermäktiga bankar. Köpenhamnskalkstenen har i genomsnitt ett flintinnehåll på cirka 20 %. Kalken karakteriseras av en relativt horisontell lageruppbyggnad där de ingående lagren växlar i hårdhet från helt lösa till mycket hårda. Köpenhamnskalkstenen som är lokaliserad i de övre metrarna av kalkberget är ofta starkt uppsprucken eller krossad vilket sannolikt orsakats av inlandsisen. Inom stora delar av området mellan Saltolmen och in över Malmö är Köpenhamnskalkstenen borteroderad vilket innebär att Bryozokalkstenen bildar berggrundsytta.
- **Grönsand** - Grönsand är den yngsta berggrunden i Malmöregionen och före-kommer endast inom några få begränsade områden söder om Malmö. Grönsand består i de flesta fall av okonsoliderad glaukonithaltig lera, sand och

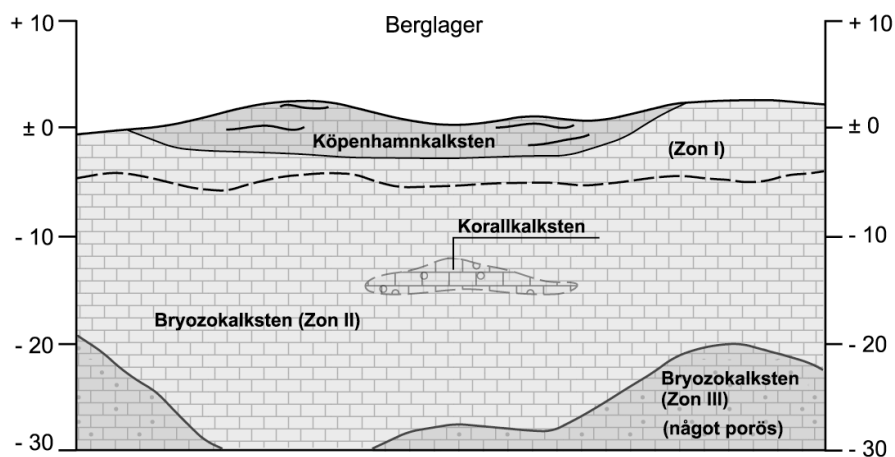
kalksten. Glaukonit är ett vattenhaltigt kaliumjärnsilikat som främst uppträder i sedimentära bergarter.

3.3 Station Triangelns lokala berggrundsbeskrivning

Som framgår av figur 3.3a och 3.3b nedan så höjer sig mark- och bergnivån någorlunda likformigt med cirka 5 meter i sydlig riktning.



Figur 3.3a Principiell jordlagerföljd i Triangelområdet (Citytunnelprojektet [11])



Figur 3.3b Principiell berglagerföljd i Triangelområdet (Citytunnelprojektet [11])

Bergkullarna består generellt av kraftigt uppsprucken och vattenförande Köpenhamnkalksten som motstått den glaciala erosionen. Köpenhamnkalkstenen är mäktigast (cirka 4 meter) i tunnellen och tunnas ut i västlig riktning. Antagligen ökar mäktigheten mot öster.

Berggrunden vid Triangelområdet består framförallt av Bryozokalksten med inslag av korallkalksten och konglomerat. I Bryozokalkstenen finns det en zon med högre porositet än under- och överlagrande kalksten som dock är mindre mäktig här (5-10 meter) i förhållande till andra delområden längs Citytunneln.

3.4 Jordartsbeskrivning

Jordlagerförhållandena i Malmöregionen är ovanligt komplexa och delvis ofullständigt kända.

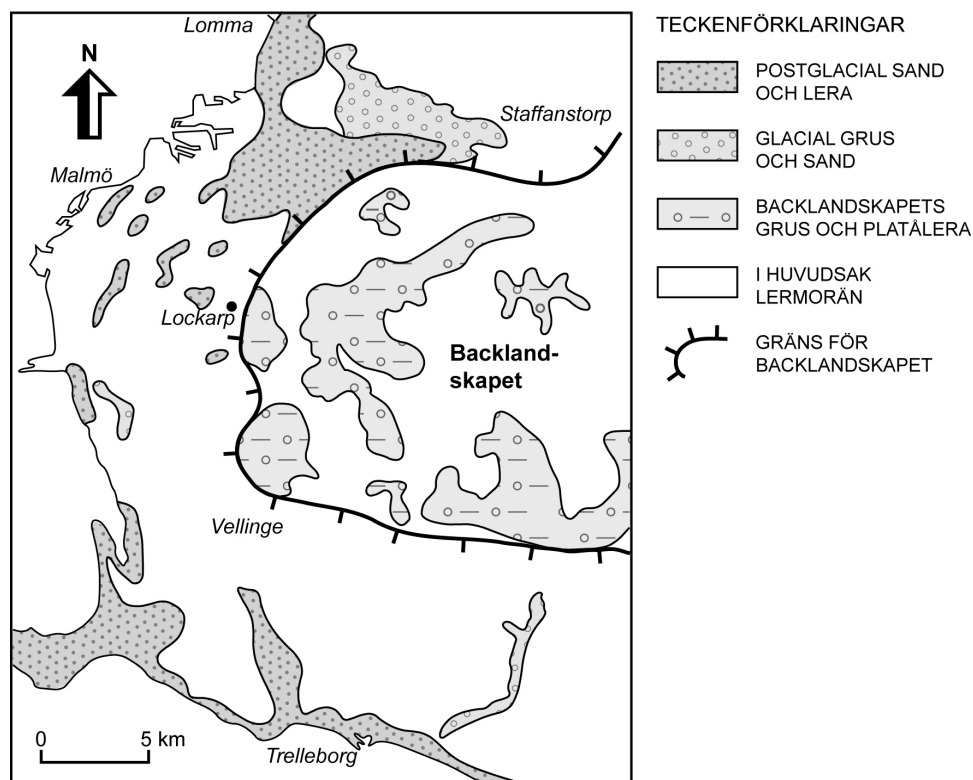
I sydvästra Skåne domineras jordlagren av lerhaltiga moränbildningar. Ofta förekommer det två moränlager på grund av att inlandsisen avsmältes i olika omgångar.

I Malmös sydöstra ytterområde och väster om Romeleåsen tar det så kallade backlandskapet vid som består av ett kuperat böljande landskap med många sjöar. Här blev ett stort antal isblock (dödisar) liggande kvar i slutskedet av isens avsmältning och leror avsattes i issjöarna mellan isblocken. På kullarnas toppar förekommer ofta sedimentär lera, så kallad plåtålera.

I backlandskapets yttre gräns mot Malmö kan isälvsmaterial förekomma och dessa avlagringar har ofta kontakt med underliggande kalkberggrund.

I norra Malmöområdet dominerar jordlagren av lermoräner som normalt är 5-10 meter maktiga. Lerhalten går från att vara hög i de övre delarna mot att silt blir dominerande mot djupet.

Figur 3.4 nedan visar en förenklad jordartskarta över sydvästra Skåne.



Figur 3.4 Förenklad jordartskarta över sydvästra Skåne, (Citytunnelprojektet [12])

3.5 Jordarternas lagerenheter

Den principiella jordlageruppbyggnaden i Malmöregionen kan i tur och ordning från markytan och ned till bergrunden delas in i följande jordlagerenheter: fyllning, torv, övre sediment, övre morän, undre sediment och undre morän [29], se figur 3.2.

- **Undre morän** - Jordlagren domineras av ett oftast 5-15 meter mäktigt täcke av morän som avsattes vid den sista inlandsisens avsmältning för cirka 15000 år sedan. Moränytan är generellt jämn och följer i stort set den underliggande bergtopografin.
- **Undre sediment** - De undre sedimenten består huvudsakligen av isälvsavlagringar och utgörs främst av sand med växlande inslag av silt och grus. Enheten förekommer i avgränsande stråk ovanpå den undre moränen.
- **Övre morän** - Den övre moränen är en lagerenhet som huvudsakligen utgörs av omlagrade glaciala avlagringar. Enheten har vanligen en mäktighet på cirka 1-5 meter och byggs upp av moränlera eller lerig sandig morän med inslag av sorterad lera eller sand.
- **Övre sediment** - De övre sedimenten består av postglaciala svall- och svämavlagringar som i större delen av Malmös innerstad och hamnområden har en mäktighet i upp till cirka 5 meter.
- **Torv** - Flertalet torvförekomster är små och oregelbundet formade och utgörs av postglaciala organiska avlagringar med ringa mäktighet.
- **Fyllning** - Delar av norra Malmö är grundlagda på utfyllnadsmassor. Dessa kan vara upptill 5 meter mäktiga och består vanligtvis av lermorän men kan också innehålla varierande material såsom sand, krossad kalksten, organiska jordlager, byggavfall mm.

3.6 Station Triangelns lokala jordartsbeskrivning

Triangelområdet sträcker sig från Stadsteatern till norra delen av Malmö Allmänna Sjukhus (MAS) och den principiella lagerföljden längs denna del av citytunneln framgår av figur 3.3. Observera dock de olika höjdskalorna i figuren.

Som framgår av figur 3.2 domineras jordlagren av lermorän med inslag av det intermoräna sedimentet sand. Svackorna i delområdets lermorän är utfyllda med svämsand.

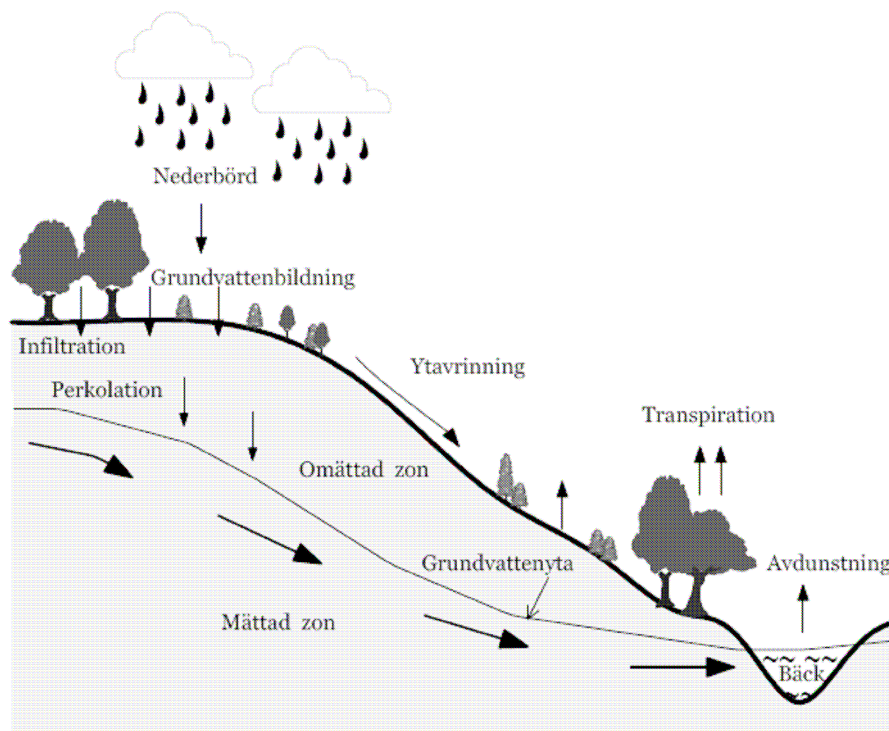
4 Allmänt om grundvattenförhållanden

Beroende på bergart kan grundvatten förekomma i bergets sprickor eller porsystem. De flesta kristallina bergarter (med kristallint berg avses magmatiska, metamorfa samt konsoliderade sedimentära bergarter) är vattentäta och därför finns grundvatten endast i bergets sprickor. Sedimentära bergarter så som Malmös kalksten är däremot grovkorniga i jämförelse med kristallina bergarter och av denna anledning kan grundvatten förekomma i sedimentära bergarters porsystem i lika stor utsträckning som i spricksystemet.

4.1 Grundvattenbildning

Grundvatten bildas genom att regn- och smältvatten tränger genom markytan och fyller porer i marken och sprickor i berggrunden. Innan vatten infiltreras genom markytan avdunstar en del direkt tillbaka till atmosfären. Av återstående mängd tas en del upp av växternas rötter och avgår till atmosfären genom transpiration. Resten fortsätter vidare ner mot grundvattenytan och bildar så småningom grundvatten i den mättade zonen [23].

Grundvattenbildningens storlek beror av många olika faktorer och kan ha stora lokalvariationer. En viktig faktor i tätbebyggda områden är mängden hårdgjord yta och i stor utsträckning styrs också grundvattenbildningen av dagvattenuppsamlingen. Den hårdgjorda ytan kan ha större betydelse för den sammanlagda avdunstningen (evapotranspiration) än vad man tänkt sig eftersom att mängden växter är liten i tätbebyggda områden. Det medför att grundvattenbildningen kan vara större än vad man intuitivt föreställer sig.



Figur 4.1 Grundvattenbildning, principfigur (Lundmark [23])

4.2 Grundvatten i jord- och berg

Jord- och berglager byggs upp av olika geologiska lagerenheter, som består av olika geologiska material med olika egenskaper. De olika lagerenheternas förmåga att lagra och transportera grundvatten varierar därmed också mycket. Enligt ”Malmö grundvatten” [29] är en av de viktigaste materialegenskaperna den effektiva porositeten, dvs. den volymsandel av materialet i vilken vatten kan strömma. Gustafson [20] skiljer ett bergs porositet i matrixporositet (primär porositet) som huvudsakligen lagrar vattnet i berget och sprickporositet (sekundärporositet) som huvudsakligen står för vattenflödet i berget.

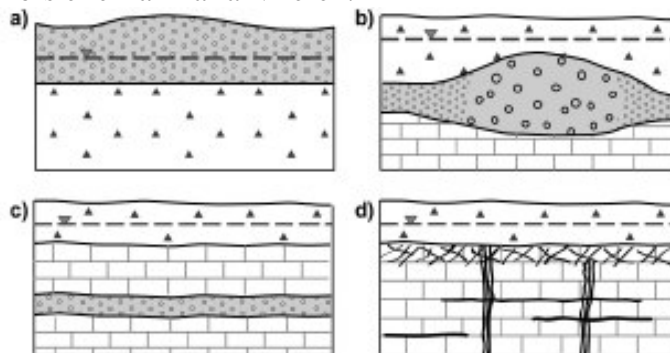
Man brukar dela in jord- och berglager i akviferer och barriärer beroende på lagerenheternas egenskaper såsom ett lagers vattenföringsförmåga.

4.2.1 Akviferer och barriärer

En akvifer kan beskrivas, enligt ”Malmö grundvatten” [29], som en grundvattenförande geologisk lagerenhet som t ex ett gruslager eller ett kalkstenslager och en barriär kan beskrivas som en svårgenomtränglig zon mellan två akviferer. Exempel på barriär i Malmö är den svårgenomträngliga undre moränen mellan kalkberget och det övre jordlagret eller olika täta partier i kalkstenen mellan två genomsläppliga zoner i kalkberget.

En akvifer kan i princip vara öppen, sluten eller läckande, eller en kombination av dessa typer:

- **Öppen akvifer** - En öppen akvifer har direkt kontakt med atmosfären och grundvattenytan är en fri vattenyta. Grundvattenbildningen till en öppen akvifer sker genom att det nederbördsvattnet som inte avdunstar eller avrinner som ytvatten rör sig från markytan till grundvattenytan.
- **Sluten akvifer** - En sluten akvifer täcks av ett tätande lager och grundvattnets trycknivå står högre än det tätande lagrets undre gränsyta.
- **Läckande akvifer** - En läckande akvifer utgörs av en akvifer som överlagras och/eller underlagras av ett geologiskt material med låg genomsläpplighet där vatten tillförs eller lämnar akviferen.



Figur 4.2 Exempel på olika typer av akviferer: a) Svallsandsavlagring, öppen porakvifer, b) Isälvsavlagning täckt av morän, sluten porakvifer, c) Sandsten, över och underlagrad av kalksten, sluten porakvifer, d) Kalksten med betydande yttlig sprickighet samt vertikala och lagerparallella sprickor, sluten sprickakvifer. (”Malmö grundvatten” figur 7 [29])

4.3 Grundvattenströmning

Ur ett hydrogeologiskt synätt är geologiska strukturer såsom sprickor, foliationer, krosszoner, bankplan, förkastningar mycket viktiga på grund av att grundvattenströmningen huvudsakligen sker i dessa zoner. Ett antal olika faktorer såsom tryck, temperatur, råhetsgrad, sprickgeometri etc. påverkar grundvattnets strömningsförmåga. Om en spricka är fylld med exempelvis lera påverkas också detta strömningsförmågan (Singhal och Gupta [30])

Grundvattenströmning beror av bergets förmåga att leda vatten och skillnader i tryck mellan olika punkter i vattnet. Darcys lag säger att vattenflödet per ytenhet, $(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}^2$, mellan två punkter är lika med det geologiska materialets vattengenomsläpplighet multiplicerat med differensen i grundvattennivå mellan punkterna delat med avståndet mellan dem. Darcys lag kan med denna förenkling skrivas som:

$$q = -K * I$$

där q = Grundvattenflöde per ytenhet (Darcyflöde, specifikt flöde), $((\text{m}^3/\text{s})/\text{m}^2)$

K = Vattengenomsläppligheten (hydrauliska konduktivitet) (m/s)

I = Hydrauliska gradient (negativ i strömningsriktningen), (m/m)

Darcys lag gäller dock bara vid laminär strömning. Då grundvatten strömmar i jord och berg är hastigheten normalt låg och strömningen laminär men i vissa lägen som exempelvis vid propumpning kan hastigheten bli så stor att flödet blir turbulent.

Enligt Blomquist *et al.* [5] använder man sig av två grund karakteristika när man vill beskriva ett hydrogeologiskt problem. Det första är ett bergs förmåga att förvara vatten, bergets porositet, och det andra är bergets förmåga att leda vatten, hydraulisk konduktivitet.

4.4 Hydrauliska egenskaper

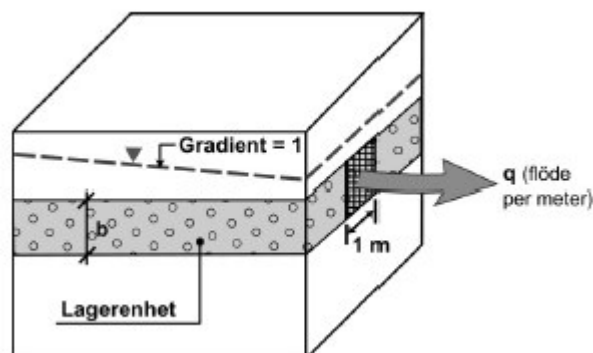
4.4.1 Hydraulisk konduktivitet och hydraulisk gradient

Hydraulisk konduktivitet, kan beskrivas som ett geologiskt materials genomsläpplighet med avseende på grundvatten och hydraulisk gradient kan beskrivas som grundvattennivåns ändring per längdenhet (förlusten i lägesenergi) längs grundvattnets flödesbana eller i annan given riktning, (Carlsson och Gustafson [15]).

4.4.2 Transmissivitet

Många gånger använder man sig av transmissivitet när man vill beskriva om ett geologiskt lager har en hög vattenförande förmåga. Man kan säga att hög transmissivitet står i synonym med hög vattenförande förmåga. Transmissivitet kan beskrivas som förmågan hos ett jord- eller berglager att transportera grundvatten T (m^2/s). Alltså den mängd grundvatten (m^3) som transporteras per breddenhet (m) av lagerenheten per sekund vid en hydraulisk gradient 1. Transmissiviteten påverkas således av både lagerenhetens tjocklek och material. Mellan transmissivitet och

hydraulisk konduktivitet gäller relationen $T = K \times b$, där b är lagerenhetens tjocklek, ("Malmö grundvatten" [29]).



Figur 4,3 Definition av transmissivitet ("Malmö grundvatten" [29])

4.4.3 Läckagekoefficient

Läckagekoefficienten utgörs av kvoten mellan det lågpermeabla lagrets hydrauliska konduktivitet och dess mäktighet. Läckagefaktorn definieras som roten ur kvoten mellan akvifärens transmissivitet och över- eller underliggande lagrets läckagekoefficient, se formler nedan [15]:

$$\text{Läckagekoefficient} \quad K'/b' \text{ [1/s]} \quad (2)$$

$$\text{Läckagefaktor} \quad B = \sqrt{(T \cdot b'/k')} \text{ [m]} \quad (3)$$

4.5 Utvärderingsmetoder vid propvpumpning

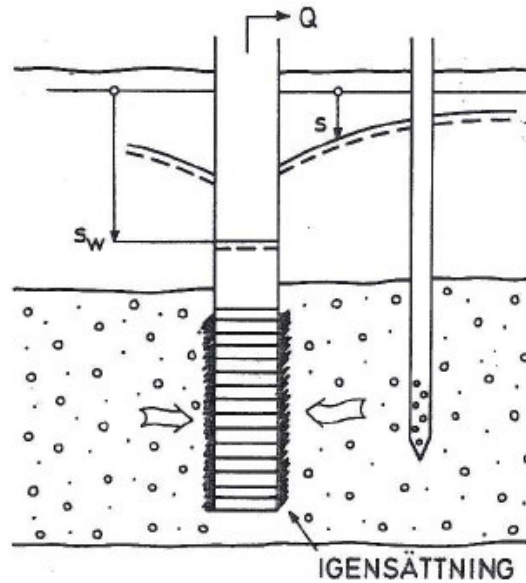
Vid en propvpumpning mäter man nivån i olika obsrör vid olika tidpunkter. Enligt Carlsson och Gustafson [15] kan data följaktligen arrangeras på två olika sätt:

- 1) Tidsserier för olika rör, tid – avsänkning
- 2) Avsänkning i olika rör vid viss tidpunkt, avstånd – avsänkning

De flesta utvärderingsmetoder för propvpumpningsdata bygger på att man plottar tid – avsänkning eller avstånd – avsänkings kurvor i ett diagram. Det finns en mängd olika utvärderingsmetoder för propvpumpningsdata. Exempel på utvärderingsmetoder som används inom Citytunnelprojektet är följande: Jacobs, Theis-Walton, Theis-Ramey. Dessa metoder kan ses i Carlsson och Gustafson [15]. Nedan beskrivs en approximativ metod med skinfaktor:

4.5.1 Approximativ metod med skinfaktor

De data som oftast är enklast att erhålla från en brunn är uppfodrad vattenmängd och avsänkning. Avsänkningen från en något igensatt brunn kommer att avvika något från den teoretiska. Denna ytterligare avsänkning beror av förlusten i det igensatta området, skin, eller brunnens utformning vid en ofullständig brunn. Man kan bemästra problemet genom att lägga till en skinfaktor ξ , som beskriver tilläggsavsänkningens storlek i relation till den teoretiska (Carlsson och Gustafson [15]).



Figur 6.1 Avsänkning i en brunn med igsättningar (efter Carlsson och Gustafson [15])

För ett homogent grundvattenmagasin med transmissiviteten, T , kan avsänkningen på ett avstånd, R_0 , från brunnen vid vattenuttaget, Q , och brunnsradien, r_w , beräknas som:

$$s_w = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot (\ln R_0 / r_w + \xi) \quad (4)$$

Brunnens specifika kapacitet definieras som uttag genom avsänkning, Q/s_w . Transmissiviteten kan således beräknas som:

$$T = \frac{Q}{s_w} * \frac{\ln R_0 / r_w + \xi}{2 \cdot \pi} \quad (5)$$

Normalt gäller att $\ln (R_0 / r_w) > 7$ och om då skinfaktorn ξ , är större än noll kan transmissiviteten uppskattas till:

$$T \geq \frac{Q}{s_w} * \frac{(7 + 0)}{2 \cdot \pi} = 1,1 \frac{Q}{s_w} \quad (6)$$

4.5.2 Utvärdering av skinfaktor

Ett sätt att utvärdera brunnars skinfaktor är att plotta beräknad transmissivitet i relation till den specifika kapaciteten. En brunns specifika kapacitet kan definieras enligt Carlsson och Gustafson [15] som kvoten av uttaget och avsänkningen i brunnen. Den specifika kapaciteten förändras under ett transient skede. Denna förändring är vanligen långsam med undantag av under tiden närmast efter pumpstart. Vid konstant specifik kapacitet är denna i stort sett proportionell mot akvifärens transmissivitet (Carlsson och Gustafson [15]). Plottning av specifik kapacitet (Q/s) och transmissivitet (T) ger:

$$\frac{Q}{s} = \kappa \cdot T \quad (7)$$

Vid omskrivning av ekvation (4) finner man:

$$\frac{Q}{s} = T \cdot \frac{2\pi}{\ln(R_0 / r_w) + \xi} \quad (8)$$

Om $\ln(R_0 / r_w) \approx 7$ medför det att ekvation (8) kan skrivas som:

$$\frac{Q}{s} = T \cdot \frac{2\pi}{7 + \xi} \quad (9)$$

Vid sammanställning av ekvation (7) och (9) finner man att skinfaktorn kan skrivas som:

$$\xi = \frac{2\pi - 7\kappa}{\kappa} \quad (10)$$

4.6 Naturliga variationer

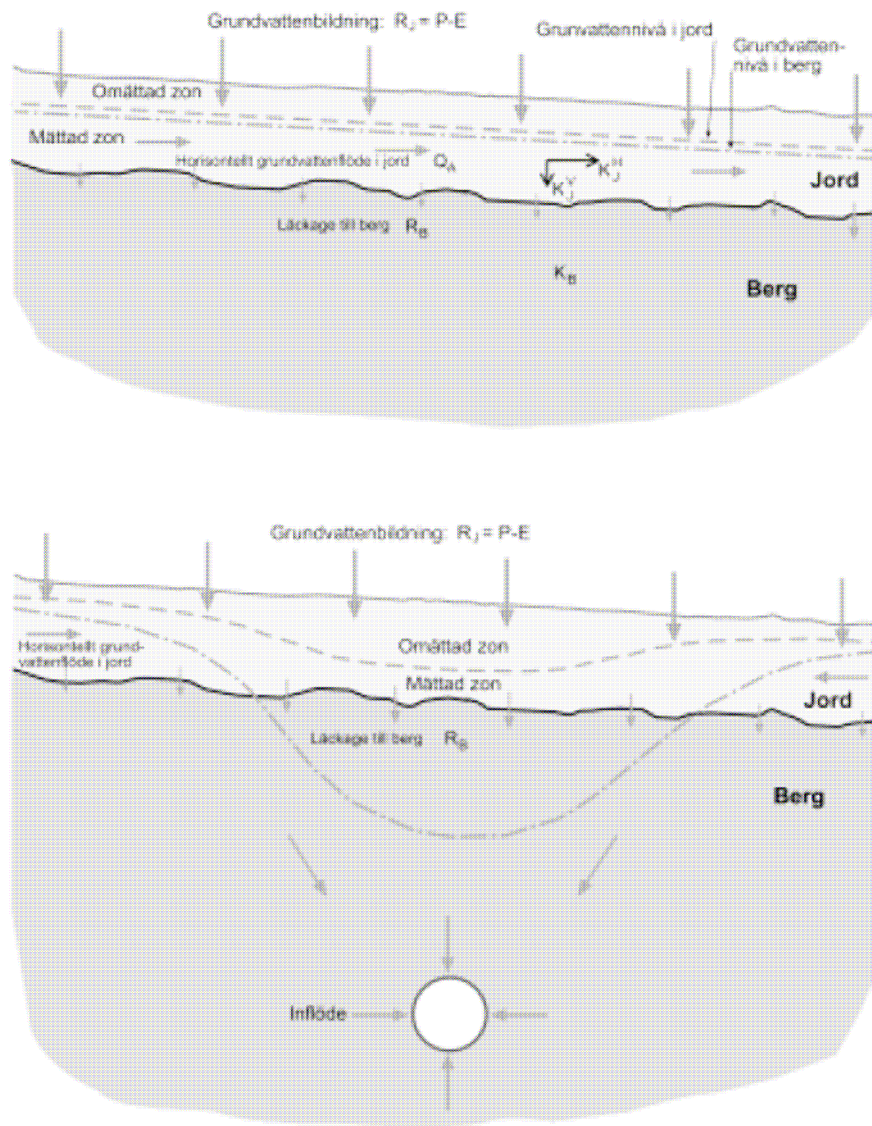
Grundvattennivåns naturliga variationer beror på en mängd olika faktorer. Korttidsvariationer kan bero på nederbördsförhållandena. Exempelvis kan ett kortvarigt intensivt regn med efterföljande torrperiod ge växlande höjningar och sänkningar av grundvattennivån. Grundvattennivån varierar också naturligt över året. På vintern i samband med tjällossningen och snösmältningen kan nivån höjas och under sommaren då avdunstningen och växternas vattenupptagning är stor kan nivåerna sänkas. Om man ser över en längre period än ett år kan grundvattennivån ändras på grund av exempelvis förändringar av klimatet eller olika mänskliga ingrepp i naturen såsom byggande av tunnlar eller hårdgjorda ytor [23].

4.7 Grundvattensänkning till följd av byggande i berg

Vid byggnation och drift av en bergstunnel kan grundvatten strömma in i tunneln där den korsar vattenförande sprickor och sprickzoner. Inflödets storlek beror främst på bergets vattengenomsläpplighet.

Inflödet till tunneln ger upphov till en sänkning av grundvattentrycket i berggrundens spricksystem. Trycksänkningen utbreder sig bort från tunneln tills jämvikt råder mellan inflödet till tunneln och tillrinningen till berggrunden. Enligt Axelsson [3] visar erfarenheter från olika undermarksanläggningar att storleken på det påverkade området i berggrunden kan uppgå till några kvadratkilometer. Om tunneln via sprickor står i hydraulisk kontakt med större ytvattendrag (exempelvis Öresund eller kanalsystemet i Malmö) blir det påverkade området mer begränsat. Om grundvattentrycket i berggrunden sänks kan grundvattnet i jordlagren påverkas genom en ökad tillrinning till berggrunden. Då jorden består av tätare jordar, såsom finkornig morän och lerjordar, sker ingen påtaglig grundvattensänkning. Vid grovkornigare jordarter, såsom sand och grus, kan grundvattnet sänkas betydligt (Axelsson [3]).

Figur 4 nedan visar grundvattenströmning i jord och berg under naturliga förhållanden och under störda förhållanden med inläckage till bergrum. På grund av inläckage av vatten till bergrummet sänks grundvattentrycket i berget runt bergrummet. Detta medför en ökad infiltration från jordlagret till berggrunden. (Axelsson [3])



Figur 4.4 Grundvattenströmning i jord och berg under (a) naturliga förhållanden och under (b) störda förhållanden p.g.a. inläckage. Nederbörd (P), Avdunstning (E), Grundvattenbildning (R_J), Läckage till berggrund (R_B), Grundvattenflöde (Q_A) ([figur B2-1, Axelsson [3]])

4.8 Metoder för att minska grundvattensänkning

Det finns flera olika metoder för att minska inflödet till en undermarksanläggning. Exempelvis genom att injektera berggrunden för att på det sättet minska dess vattengenomsläpplighet eller att infiltrera uppumpat vatten från undermarksanläggningen till återinfiltrationsbrunnar där en sänkning kan tänkas ske.

4.8.1 Injektering

Injektering kan göras av två anledningar, tätning och förstärkning. Man kan dela upp injekteringsmedel i två kategorier, cementbaserade och kemiska. Cementbaserade injekteringsmedel används i första hand till tätning vid sprickvidder ner till ca 0,1 mm. Kemiska injekteringsmedel kan delas upp i silikater och polymerer där

silikaterna är vattenlösliga och polymererna inte är vattenlösliga. Silikaterna bör kombineras med cementinjektering då de inte är beständiga vid kontakt med syre. Silikasol kan också nämnas som trots att den består av SiO_2 har en helt annan uppbyggnad än silikaterna och den är dessutom kemiskt stabil. Förinjektering används vid bergrumsbyggen för att man vill uppnå en torrare arbetsmiljö och för att man vill minska inläckage till tunneln (Lindblom [21])

4.8.2 Infiltration

Grundvatten som läcker in i en undermarksanläggning eller pumpats upp av uttagsbrunnar kan infiltreras i områden där en sänkning kan tänkas ske. Infiltrationsbetingelserna varierar med jordart och terräng. Förhållandena är bäst vid genomsläpplig geologi belägna i höjdområden eller slutningar. Infiltration av uppumpat grundvatten kan leda till en lokal höjning av grundvattennivån. Detta kan leda till en försumpning av markerna och eventuellt ökad erosion på markytan och i vattendrag (Axelsson [3]).

5 Grundvattenförhållanden längs Citytunneln

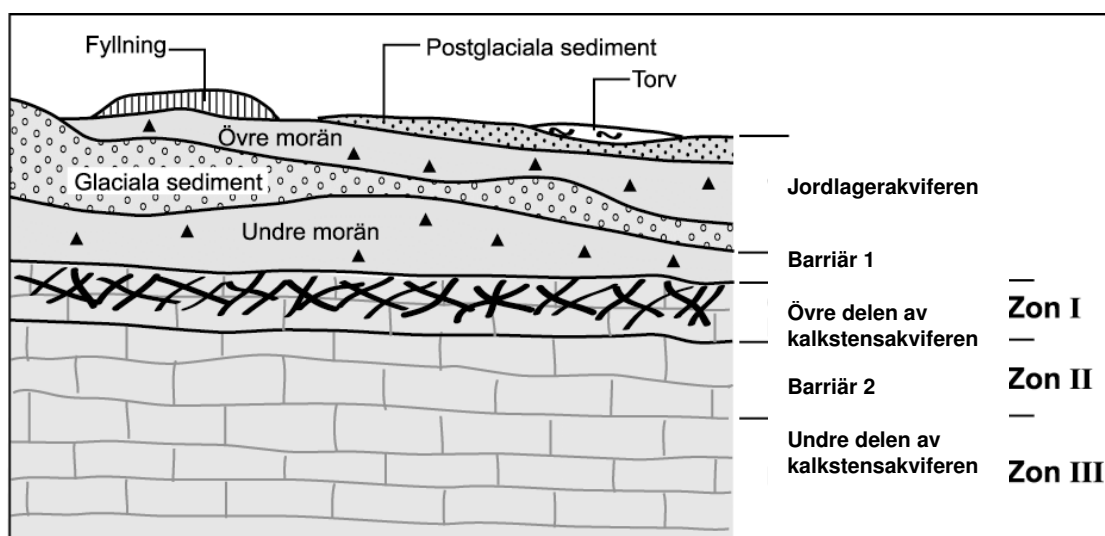
Grundvattenproblematiken vid ett tunnelbygge som Citytunneln är komplex. Ett problem som kan uppstå vid undermarksanläggningar är att grundvattennivåerna kan sänkas intill anläggningarna. Grundvattensänkningar kan medföra sättningar och skador på byggnader. Citytunneln lermoräner är dock överkonsoliderade vilket medför att sättningsproblematiken inte är så stor.

Enligt rapporten ”Malmö Grundvatten” [29] har den typ av kalksten som bygger upp berggrunden i Malmö mycket varierande porositet. Vanligen är den primära porositeten (porositet mellan enskilda korn) låg, uppskattningsvis $< 5\%$, men betydligt högre värden kan förekomma. Den sekundära porositeten (porositet i sprickor) varierar betydligt beroende på sprickförhållanden och vittring. Lokalt kan värden upp till 30-40 % förekomma i Malmös berggrund.

Grundvattenbildningen inom Malmö varierar inom intervallet $< 25 - 375$ mm/år men enligt ”Malmö grundvatten” [29] kan ett genomsnittligt värde på grundvattenbildningen för Malmö Stad vid översiktliga beräkningar och bedömningar vara ca 130 mm/år.

Längs med Citytunnelns sträckning kan upp till tre grundvattenförande lagerenheter urskiljas. I övre jordlagren förekommer normalt en öppen akvifer – jordlagerakviferen som underlagras av en barriär i den undre moränen.

Kalkberget i Malmö kan betraktas som en sluten akvifer eller så kan man dela in kalkberget i flera slutna enheter. Den övre delen av kalkstensakviferen (zon I) omfattar de översta 4 – 8 metrarna av kalkberget vilket vanligen är kraftigt uppsprucken. Den undre delen av kalkstensakviferen (zon III) är ofta porös och uppsprucken. Mellan zon I och zon III förekommer vanligen en barriär (zon II) som utgörs av en tätare kalksten. Vanligt förekommande akviferer och barriärer längs med Citytunneln kan ses i figur 5.1 nedan.



Figur 5.1 Akviferer och barriärer längs med Citytunneln (Citytunnelprojektet [11])

I Malmö ligger vanligtvis grundvattennivån i jordlagren 1-3 meter under markytan med säsongsvariationer på +/- 1 meter. Havsyntans aktuella nivåer påverkar dock grundvattennivån inom områdena nära Öresund och längs kanalerna [11].

Ytvatten förekommer i Malmö i form av Öresund, kanalsystem, hamnbassänger, dammar och enstaka ytvattendrag. Kanalsystemet, som har tre förbindelser mot Öresund, kan delas in i ett inre system med en längd av cirka 3.5 km och ett genomsnittsdjup på 2,9 meter och det yttre kanalsystemet som i allmänhet är lite djupare [11].

5.1 Förväntad förändring av grundvattennivåer till följd av Citytunnel

Under byggskedet av Citytunneln kommer grundvattennivåerna att förändras tillfälligt och under driftskedet kommer tunneln i princip vara tät. Enligt miljökonsekvensbeskrivningen [31] kommer följande grundvattennivåförändringar ske under:

Byggskedet

- Vid angreppsschakterna kommer man att behöva sänka grundvattennivåerna för att få en torr byggrop.
- En viss grundvattensänkning kommer även att äga rum vid utförandet av tvärtunnlarna.
- På grund av att trycket framför TBM-maskinerna är högre än vattentrycket kommer det normalt inte erhållas någon mätbar avsänkning i anslutning till tunnelfronten.
- Vid Triangeln och Holma kommer man att sänka grundvattennivåerna för att få en torr byggrop.
- Lokalt kan det förekomma grundvattenhöjningar kring återinfiltrationsbrunnarna.

Driftskedet

- Försumbara inläckande vattenmängder kan förväntas vid huvudtunnlar, tvärtunnlar och angreppsschakt. Beräkningar visar att grundvattennivåsenkningen i kalkberget är mindre än 0,3 meter i anslutning till tunnlar.

5.2 Hydrogeologiska förhållanden vid station Triangeln

Vid Triangeln förekommer en jordlagerakvifer, en ytlig uppsprucken kalkstensakvifer som i stora drag sammanfaller med Köpenhamnskalkstenen och en barriär som utgörs av Bryozokalksten. Den ursprungliga grundvattennivån ligger på omkring +3 i den norra delen och kring +4 i den södra delen [11].

För att tillskapa en möjlighet att avvattna kalkberget över bergrummet och för att reducera utsträckningen av den avsänkningstratt som avsänkningen ger upphov till omges station Triangeln av en injekteringsskärm. Injekteringsskärmen, som utgörs av cement, borrar från markytan ned till underkanten av den ytliga genomträngliga Köpenhamnskalkstenen (Citytunnelprojektet [11])

5.3 Utförda förundersökningar vid station Triangeln

Ett antal förundersökningar har gjorts vid station Triangeln där geologiska, geotekniska och geohydrologiska egenskaper har utvärderats.

Under perioden 1998-1999 genomfördes exempelvis ett antal provpumpningar, kapacitetstester och flödesmätningar i området och under perioden 2001-2002 gjordes ett antal kompletterande undersökningar. Vid tidpunkten då grundvattenssystemet installerades provpumpades samtliga pump- och infiltrationsbrunnar av entreprenören. Detta gjordes under 2005 innan byggstart för att testa systemet.

6 Grundvattenmodellering

Följande kapitel bygger framförallt på rapporterna ”*Evaluation of Georelated Matters, EVA Group C, Geohydrology, Update and re-calibration of numerical geohydrological model for Malmö Citytunnel*” [7] och ”Grundvattenmodellering av station Triangeln”, [18].

6.1 Allmän beskrivning

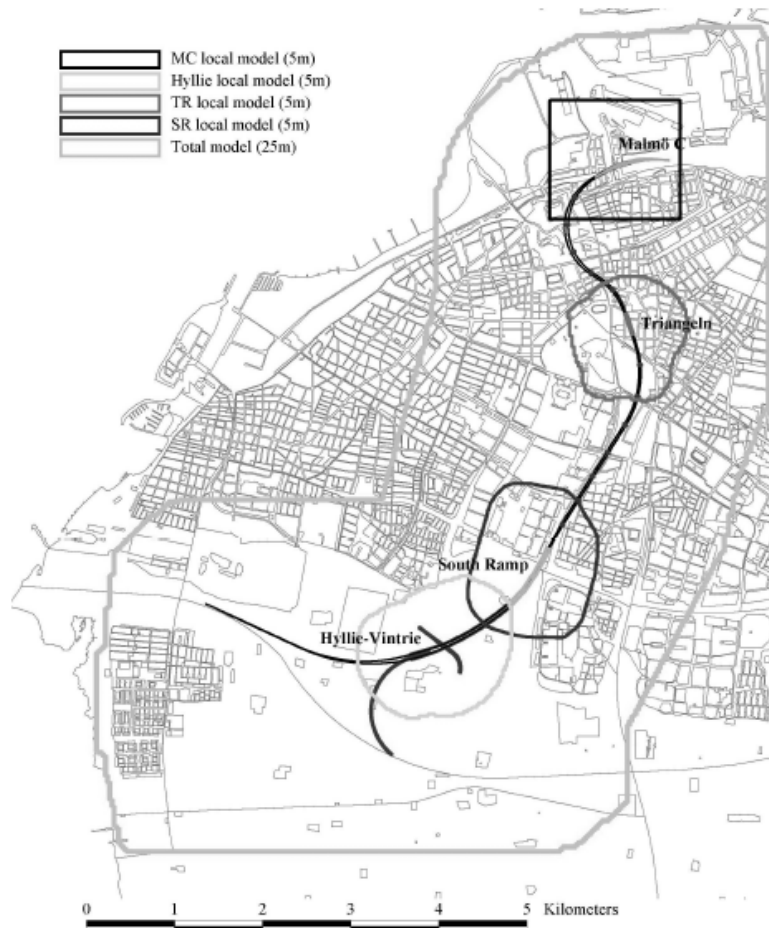
Som ett led i förundersökningarna kring Citytunneln har grundvattensimuleringar utförts i numeriska grundvattenmodeller. Dessa 3-dimensionella hydrologiska modeller är baserade på modellsystemet MIKE SHE. Följande modeller har upprättats:

- En regionalmodell som i princip omfattar hela Malmö
- En totalmodell med högre upplösning än regionalmodellen som innefattar hela Citytunneln.
- Lokala konstruktionsmodeller för olika anläggningsdelar samt kalibreringsmodeller.

De lokala konstruktionsmodellerna längs Citytunneln är följande:

- Malmö C
- Station Triangeln
- Huvudtunnlar, tvärtunnlar och angreppsschakt
- Betongtunnlar och ramp i söder
- Spår vid Hyllie-Vintre

Areor över totalmodellen och lokalmodellerna Triangeln, Hyllie-Vintre, South Ramp och Malmö C kan ses i figur 6.1.



Figur 6,1 Areor över totalmodellen och lokallmodellerna Triangeln, Hyllie-Vintre, South Ramp och Malmö C (Citytunnelprojektet [7])

Den geologiska modelluppbyggnaden är avgränsad i tio beräkningslager. Från markyta räknat, representerar lager 1-4 kvartära jordavlagringar. Lager 5 utgör zon 1 och är en högpermeabel kalkstensakvifer. Lager 6,7 och 8 utgör zon II som varvas av mer eller mindre högpermeabel kalksten liksom lager 9 och 10 som utgör zon 3.

Jordlager och kalksten har tilldelats egenskaper beträffande utbredning, mäktighet och hydrauliska egenskaper. Randvillkor i form av hydrauliska gränser, dräneringar och grundvattenuttag har lagts till. Kalibreringar har gjorts för såväl dynamiska förhållanden där man tagit hänsyn till klimatvariationer över året och stationära förhållanden där ett medelklimat har använts.

Grundvattenmodellerna har kalibrerats och körts för ett antal olika scenarier. Exempelvis har modellerna körts med eller utan återinfiltration i bygg- och permanentskedet.

Grundvattenmodellens resultat innehåller en mängd osäkerheter. Osäkerheterna har sin grund i att olika hydrauliska parametrar varierar på ett komplicerat sätt och att modellen innebär generaliseringar. Egenskaperna för dessa parametrar varierar såväl i plan som i djup.

6.2 Station Triangelns lokala konstruktionsmodell

Två lokalmodeller etablerades vid triangeln. Den ena, som syftar till att fastställa influensområdet, har en upplösning på 25*25 meter och täcker ca 9 km². Den andra, vars syfte är att fastställa mängden uttag/återinfiltration, har en upplösning på 5*5 meter och täcker 0,6 km².

Modelltekniskt beskrivs grundvattensänkningen med så kallade "head controlled pumps" där ett fasthållet tryck hålls över konstruktionens yta vilket av modellen sedan omsätts till erforderlig pumpning för att hålla detta tryck [32]. Trycket i pumparna varierar från brunn till brunn beroende på de hydrologiska egenskaperna och avståndet till de närliggande uttagsbrunnarna. Enligt Citytunnelkonsortiet [32] kan brunnar som har definierats enligt ett högre tryck ofta förknippas med ett litet uttag. Triangelns lokala konstruktionsmodell utgörs av 28 stycken uttagsbrunnar som är placerade intill Triangelns arbetsområde.

En injekteringsskärm omger Triangeln som sträcker sig vertikalt i hela zon I och har en tjocklek på 2 meter och en konduktivitet på 5×10^{-6} m/s. Det uppumpade vattnet återinfiltreras i 23 stycken brunnar som är placerade utanför injekteringsskärmen.

Konstruktionen i grundvattenmodellen är även utrustad med så kallade "bleeding wells" även kallade "bleeders" var 5:e meter för att minska bottentrycket i konstruktionen.

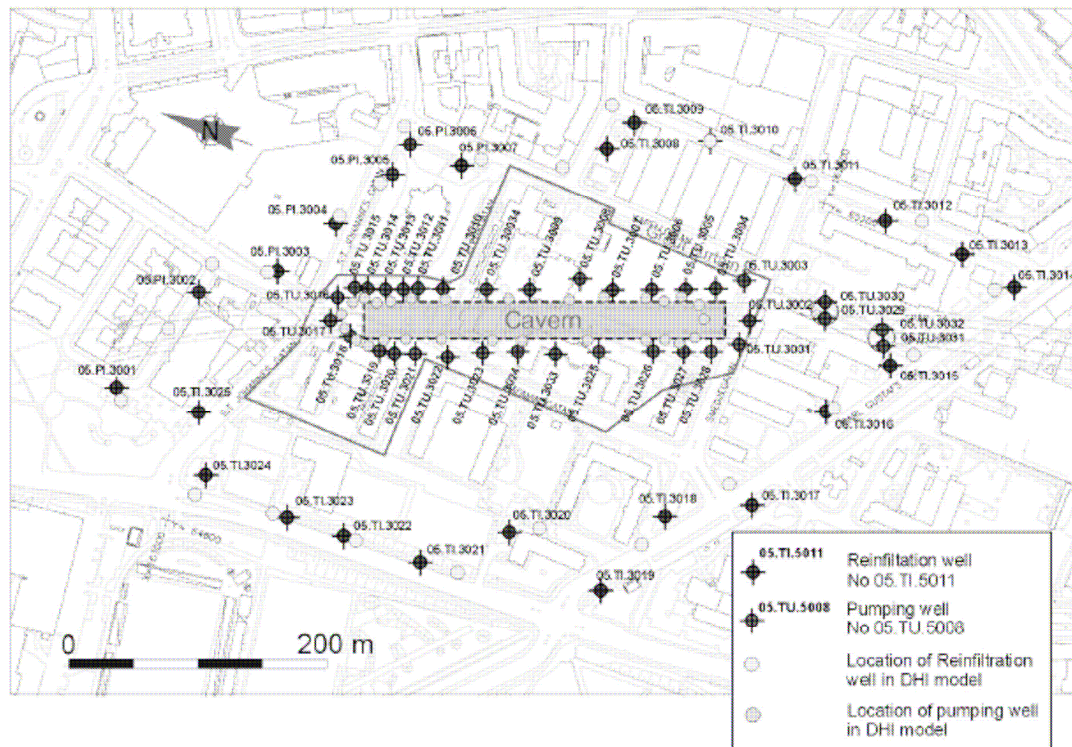
7 Triangelns grundvattensystem

För att utgrävningen av undermarksanläggningen ska kunna hållas torr och stabil måste grundvattnet vid området kring station Triangeln sänkas temporärt. Ett temporärt grundvattensystem har därför installerats vilket bland annat består av följande komponenter [25]:

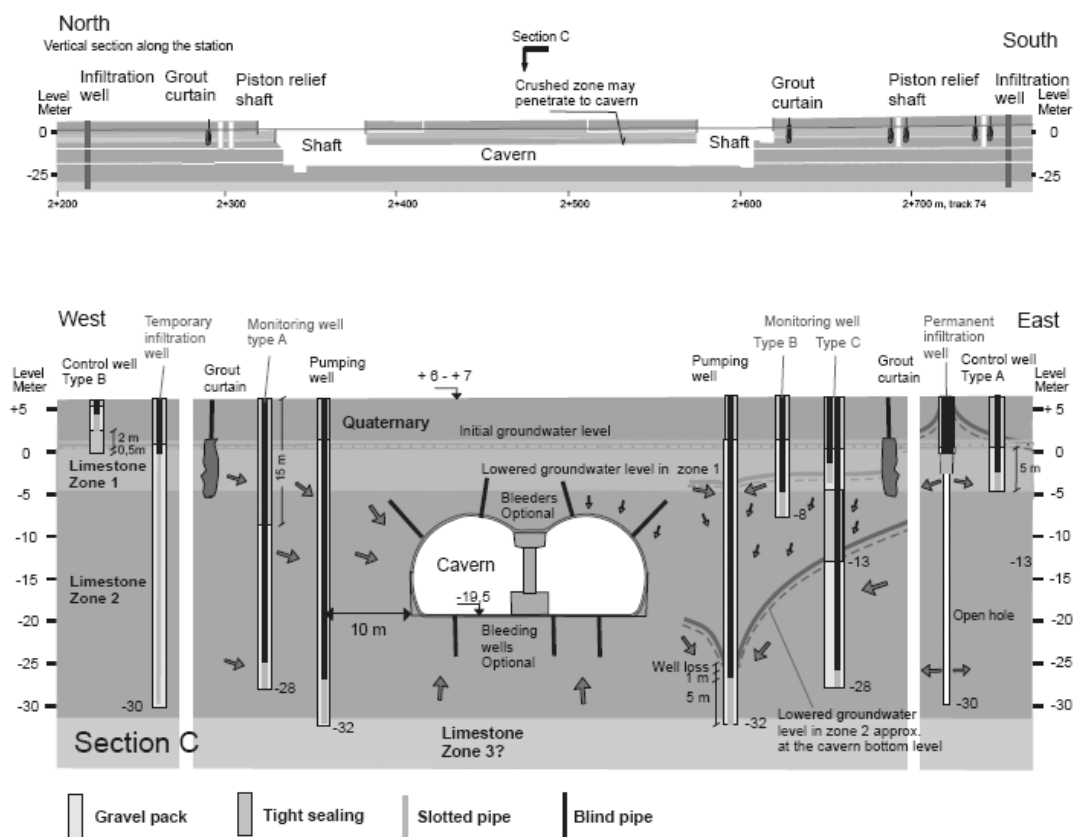
- 52st pumpbrunnar med vattennivåmätare
- 26st verifieringsbrunnar ”monitoring wells” som övervakar vattennivåerna runt konstruktionen. Den information som övervakningsbrunnarna ger styr flödet i pumpbrunnarna. Det finns tre typer av verifieringsbrunnar vilket kan ses i figur 7.2.
- Ett rörsystem som leder vatten från pumpbrunnarna till återinfiltrationsbrunnarna. Rörsystemet består av bland annat av flödesmätare och tryckregulatorer.
- 25st återinfiltrationsbrunnar ”re-infiltration wells” vars funktion är att återinfiltrera grundvattnet till kalkstenen. Återinfiltrationsbrunnarna är utrustade med vattennivåmätare.
- 31st kontrollbrunnar ”control wells” som mäter grundvattennivåerna i kalkberget och i jordlagerna över kalkberget. Kontrollbrunnarna används för att kontrollera influensområdets utbredning. Man kan dela in kontrollbrunnarna i tre typer. Typ A och B kan ses i figur 8,2 nedan och den tredje typen är ett antal brunnar som användes vid förundersökningarna.
- Ett datasystem som styr grundvattensystemet och dokumenterar exempelvis vattennivåer, pump- och återinfiltrationsvolymer.

I figur 7.1 jämförs brunnarnas lokalisering mellan grundvattenmodellen och det verkliga grundvattensystemet.

Arbetet med utgrävningen av station Triangeln görs under den initiala grundvattennivån vilket kan ses i figur 7.2 nedan. Figuren visar även de olika brunnarnas djup och principiella placering.



Figur 7.1 Brunnarnas lokalisering vid station Triangeln [35]



Figur 7.2 Principiell sektion över station Triangelns grundvattensystem som visar den temporära grundvattensänkningen och brunnarnas djup och placering [25]

8 Förundersökningsresultat

Ett stort antal förundersökningar har gjorts vid Triangeln med hänsyn till att klarlägga de hydrologiska egenskaperna i området. Under perioden 1998-1999 genomfördes ett antal provpumpningar, kapacitetstester och flödesmätningar i området och under åren 2001-2002 gjordes ett antal kompletterande undersökningar. Vid tidpunkten då grundvattensystemet installerades provpumpades samtliga pump- och infiltrationsbrunnar av entreprenören. Detta gjordes under 2005 innan byggstart för att testa systemet.

För att på ett enkelt sätt redovisa de olika förundersökningsresultaten plottas de utvärderade transmissiviteter i kumulativa fördelningsdiagram. Ett kumulativt fördelningsdiagram redovisar sannolikheten att ett uppmätt värde är mindre eller lika med ett visst värde

8.1 Borrkampanj år 1998-1999

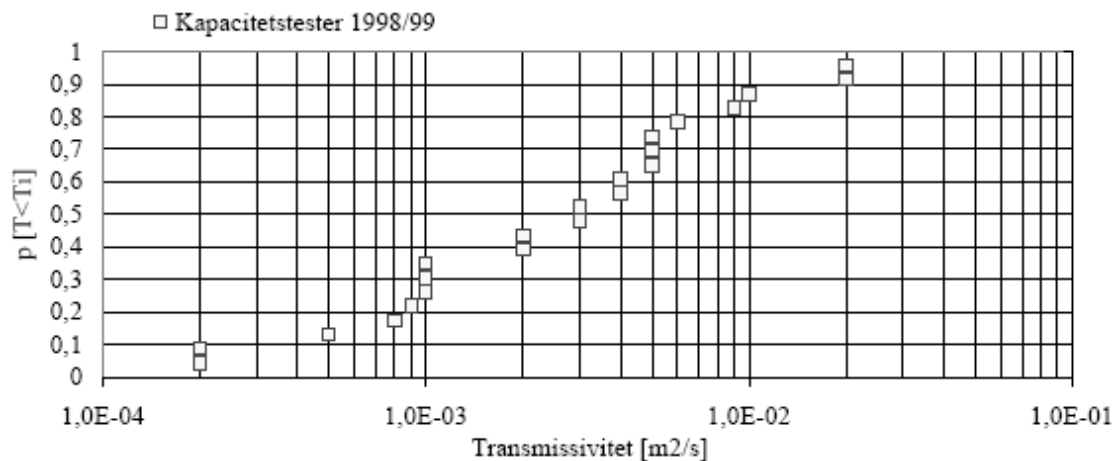
8.1.1 Kapacitetstest

Under perioden 1998-1999 kapacitetstestades ett stort antal borrhål i området kring station Triangeln. Kapacitetstesten utfördes som ett stegvis avsänkningstest med pumpkapacitet 1/3, 2/3 och 3/3 av den maximala kapaciteten. Varaktigheten för varje steg var 1.5-2 timmar. Avsänkningstegen följdes upp med 1,5 timmes återhämtning.

Samtliga kapacitetstester vid området kring Triangeln, med undantag av borrhål HB3 och HB 12, är beräknade med skinkompenserad transmissivitet. HB3 och HB12 är beräknade med enkel transmissivitetsberäkning. Vid enkel transmissivitetsberäkning beräknar man flöde Q (m^3/s) genom avsänkning s_w (m) x 1,1 i slutet av testet. Vid skinkompenserad transmissivitet är avsänkningen fördelad på inflödesmotstånd (skin) och akviferens flödesmotstånd (transmissivitet) genom användning av Δs_w mellan pumpstegen [13].

I bilaga 2 redovisas de uppmätta och beräknade parametrarna för varje kapacitetstestat borrhål i området kring Triangeln. Även undersökningspunkternas läge kan ses i bilaga 2. De beräknade transmissiviteter ligger inom intervallet $2.0 \cdot 10^{-4} - 2.0 \cdot 10^{-2}$ (m^2/s) med medelvärdet $5.5 \cdot 10^{-3}$ (m^2/s) och medianen $3.5 \cdot 10^{-3}$ (m^2/s).

I figur 8.1 redovisas de beräknade transmissiviteter i ett kumulativt fördelningsdiagram.



Figur 8.1 Den kumulativa transmissivitetsfördelningen för kapacitetstesterna 1998/99

8.1.2 Provpumpning

Under åren 1998-1999 utfördes ett antal provpumpningar längs med citytunneln. Mätdata har utvärderats enligt Jacobs och Theis-Waltons metoder. Dessa metoder beskrivs i de flesta böcker som behandlar hydrogeologi, exempelvis Carlsson och Gustafsson [15]. Beräknade hydrauliska parametrar och placering av de olika pump- och observationsbrunnarna kan ses i bilaga 1.

Provpumpning av brunnarna vid triangeln under borrkampanj 1998 utfördes av DGI där resultat och utförande redovisas i ref [16], [17]. Utvärdering av brunnarna 99.6.321 och 99.6.323 gjordes av VBB VIAK AB, se ref [33]. Sammanställning över beräknade transmissiviteter för genomförda provpumpningar under perioden 1998-1999 redovisas i bilaga 1. Samtliga brunnar förutom brunn 99.6.321 (2b) täcker zon I-III. Brunn 99.6.321 (2b) täcker zon I-II. Samtliga hydrauliska parametrar är korrigerade efter barometrisk effekter.

Nedan görs en kort sammanfattning av samtliga provpumpningar gjorda under åren 1998-1999.

99.6.321

Provpumpning av brunn 99.6.321 varade i ca 4 dygn med en återhämtning under ca 3,6 dygn och ett konstant pumpflöde på 6.6 m³/h. Brunnen var öppen för grundvatteninflöde mellan nivåerna +1.0 och -39 m. Enligt Citytunnelprojektet [13] är transmissiviteten i det undersökta området 1×10^{-4} - 3×10^{-3} m²/s, magasinskoefficienten 3×10^{-5} - 1×10^{-3} och läckagekoefficienten 10^{-9} - 10^{-8} s⁻¹.

99.6.323 (1)

Provpumpning av brunn 99.6.323 (1) varade i ca 5 dygn med en återhämtning under ca 6 dygn och ett konstant pumpflöde på 3.5 m³/h. Brunnen var utrustad med en tättslutande manschett och var öppen för grundvatteninflöde mellan nivåerna -14.7 och -39.2 m. Enligt Citytunnelprojektet [13] är transmissiviteten i det undersökta området 2×10^{-4} - 9×10^{-4} m²/s, magasinskoefficienten 2×10^{-4} - 2×10^{-3} och läckagekoefficienten 10^{-9} - 10^{-8} s⁻¹.

99.6.323 (2b)

Provpumpning av brunn 99.6.323 (2b) varade i ca 4 dygn med en återhämtning under ca 4 dygn och ett medel pumpflöde på $13.9 \text{ m}^3/\text{h}$. Brunnen var öppen för grundvatteninflöde mellan nivåerna $+0.8$ och -39.2 m . Enligt Citytunnelprojektet [13] är transmissiviteten i det undersökta området 1×10^{-4} - $8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, magasinskoefficienten 3×10^{-4} - 1×10^{-3} och läckagekoefficienten 10^{-9} - 10^{-8} s^{-1} .

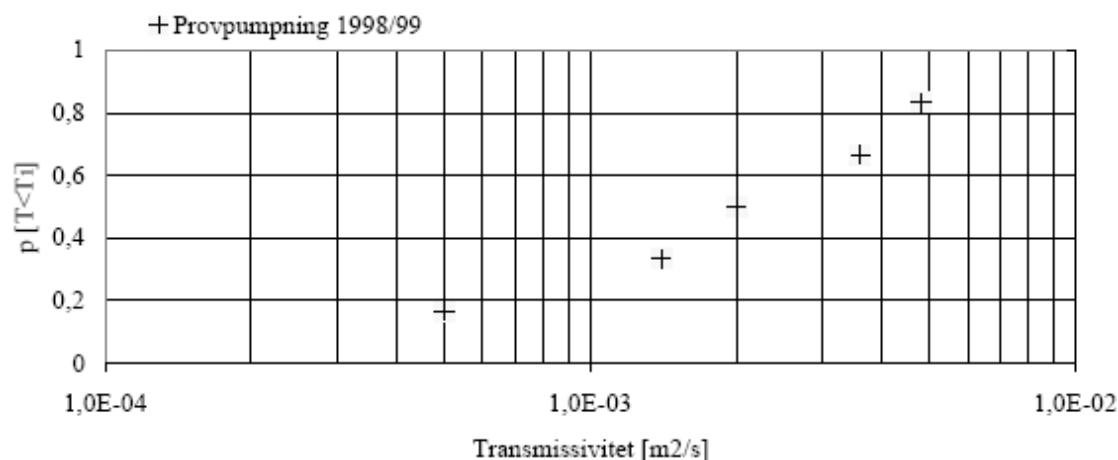
98.6.303

Provpumpning av brunn 98.6.303 varade i ca 6 dygn med en återhämtning under ca 4 dygn och ett konstant pumpflöde på $7.4 \text{ m}^3/\text{h}$. Brunnen var öppen för grundvatteninflöde mellan nivåerna $+2.3$ och -48.7 m . Enligt Citytunnelprojektet [13] är transmissiviteten i det undersökta området 0×10^{-4} - $8.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, magasinskoefficienten 7×10^{-5} - 16.8×10^{-3} .

98.6.304

Provpumpningen av brunn 98.6.304 varade i ca 4 dygn med en återhämtning under ca 3 dygn och ett konstant pumpflöde på $7.4 \text{ m}^3/\text{h}$. Brunnen var öppen för grundvatteninflöde mellan nivåerna -0.6 och -50.6 m . Enligt Citytunnelprojektet [13] är transmissiviteten i det undersökta området 1×10^{-4} - $10.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, magasinskoefficienten 19.3×10^{-4} - 21.6×10^{-3} .

I figur 8.2 redovisas de beräknade transmissiviteter i ett kumulativt fördelningsdiagram.



Figur 8.2 Den kumulativa transmissivitetsfördelningen för provpumpningarna 1998/99

8.2 Kompletterande borrningar år 2001-2002

Under perioden 2001-2002 gjordes ett antal kompletterande undersökningar vid station Triangeln. Under denna period utfördes kapacitetstester, tvåstegsavsänkningstest och två separata längre provpumpningar. Det ena testet utfördes med infiltration (Pumping test No 1) och det andra testet gjordes utan infiltration (Pumping test No 2).

Målet med "Pumping test No 1" var att undersöka möjligheten att sänka grundvattennivån med hjälp av pumpbrunnar och infiltrationsbrunnar. Målet med "Pumping test

No 2” var att klarlägga de hydrauliska egenskaperna i området och målet med tvåstegsavsänkningstestet var att öka förståeligheten för brunnarnas skin effekt.

Se referens [8], [9], [10] för resultat och utförligare beskrivning av testprogram. Utvärdering av ”Pumping test No 2” kan ses i [6].

Tillströmningen till de pumpade brunnarna skedde på nivåavsnittet ca –16 till –30 meter. Detta åstadkoms genom att brunnarnas övre hälft var avtätade mot jordlager och övre kalkberg, se principiell brunnsdesign i bilaga 1.

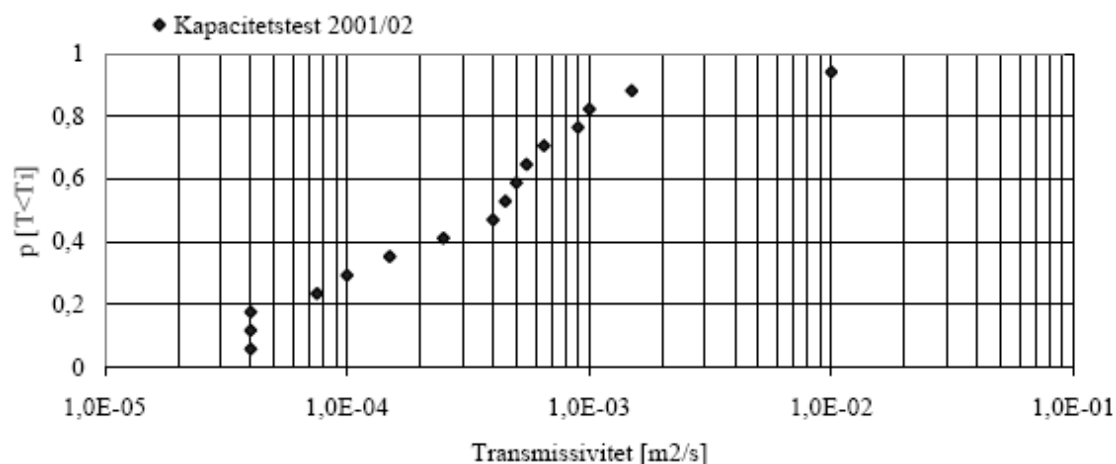
8.2.1 Kapacitetstest

Efter att brunnarna färdigställts så utfördes kapacitetstest med en undervattenspump ”submersible pumps” för att bestämma flödet i brunnen. I de flesta testen var varaktigheten 2 timmar och i ett fåtal var varaktigheten 1 timme. Under kapacitetstestet mättes avsänkningen och plottades i tid – avsänkingsdiagram. Transmissiviteten utvärderades först och främst med Cooper- Jacobs metod men också med Theims ekvation för slutna akviferer. Även Theis och Theis-Walton ”kurvpassnings” metod användes. Beskrivning av metoderna kan ses i Carlsson Gustafson [15].

I bilaga 3 redovisas de uppmätta och beräknade parametrarna för varje kapacitetstestat borrhål i området kring Triangeln under åren 2001-2002. Även undersökningspunkternas lägen kan ses i bilaga 3. I referens [14] presenteras en utvärdering av kapacitetstesterna.

Den beräknade transmissiviteten ligger inom intervallet $4.0 \cdot 10^{-5} - 1.0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ med medelvärde $1.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ och medianen $4.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

I figur 8.3 redovisas de beräknade transmissiviteterna i ett kumulativt fördelningsdiagram.



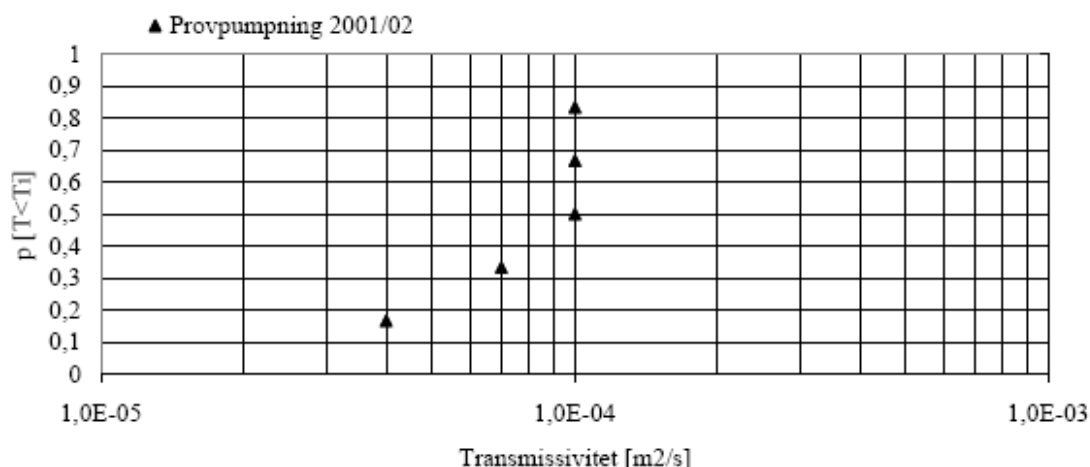
Figur 8.3 Den kumulativa transmissivitetsfördelningen för kapacitetstesterna 2001/02

8.2.2 Provpumpning

De kompletterande provpumpningarna som i referens [9] benämns ”Pumping test No 2” genomfördes med en varaktighet på 170 timmar och en återhämtningstid på cirka 180 timmar. Pumpflödet var cirka 6.3 l/s. Avsänkningen mättes i ett stort antal observationsbrunnar i området kring Triangeln.

Placering av provbrunnar, observationsbrunnar och de beräknade hydrauliska parametrarna, som är korrigerade efter barometrisk effekt, kan ses i bilaga 1 och bilaga 3. Samtliga provbrunnar täcker endast den låggenomsläppliga zon II.

I figur 8.4 redovisas de beräknade transmissiviteter i ett kumulativt fördelningsdiagram.



Figur 8.4 Den kumulativa transmissivitetsfördelningen för provpumpningarna 2001/02

8.3 Grundvattenmodelleringsresultat

Rapporten ”Grundvattenmodellering av station Triangeln” [18], redovisar simulerade resultat tagna efter en byggperiod på 1 år. Resultat från grundvattenmodelleringen visar att uttagen varierar mellan brunn och lager och att uttaget är som störst vid det nordliga schaktet.

Det modellerade uttaget från zon I är 77 m³/h och från zon II 165 m³/h vilket ger ett totalt uttag på 242 m³/h. Återinfiltrationen är beräknad till 115 m³/h i både zon I och zon II vilket ger en total återinfiltration på 230 m³/h. ”Bleeding wells” även kallat bleeders samlar enligt grundvattenmodelleringen ihop 40 m³/h i zon II. Detta innebär att återinfiltrationen är 82 % av det totala uttaget med bleeders inkluderat.

9 Konstaterande grundvattenförhållanden

9.1 Provpumpning av uttags- och infiltrationsbrunnar

I samband med att grundvattensystemet installerades vid stations Triangeln provpumpades samtliga pump- och infiltrationsbrunnar. Provpumpningarna utfördes som ett stegvis avsänkningstest med pumpkapacitet 1/4, 2/4 och 4/4 av den maximala kapaciteten. Varaktigheten för varje steg var 1 timme. Avsänkingsstegen följdes upp med 1 timmes återhämtning. Avsänkningen mättes i den pumpade brunnen och i några ytterligare brunnar i den pumpade brunnens närhet. Dock har de hydrauliska parametrarna enbart utvärderats i den pumpande brunnen.

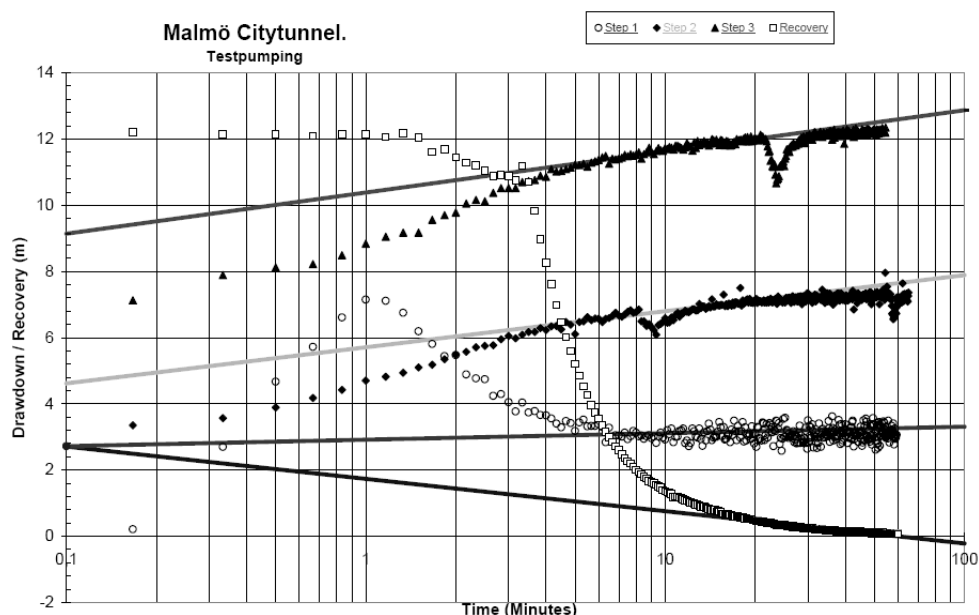
Exempel på tid-avsänkingskurvor från uttags- och infiltrationsbrunnarna kan ses i figur 9.1. Beräkning och utvärdering av uppmätt data baserades på Cooper-Jacobs metod genom att använda följande ekvation [28]:

$$T = \frac{Q \cdot \ln 10}{4 \cdot \pi \cdot \Delta s_w(\text{uppmätt})} = \frac{0,183 \cdot Q}{\Delta s_w(\text{uppmätt})} \quad (11)$$

T = Transmissivitet [m^2/s]

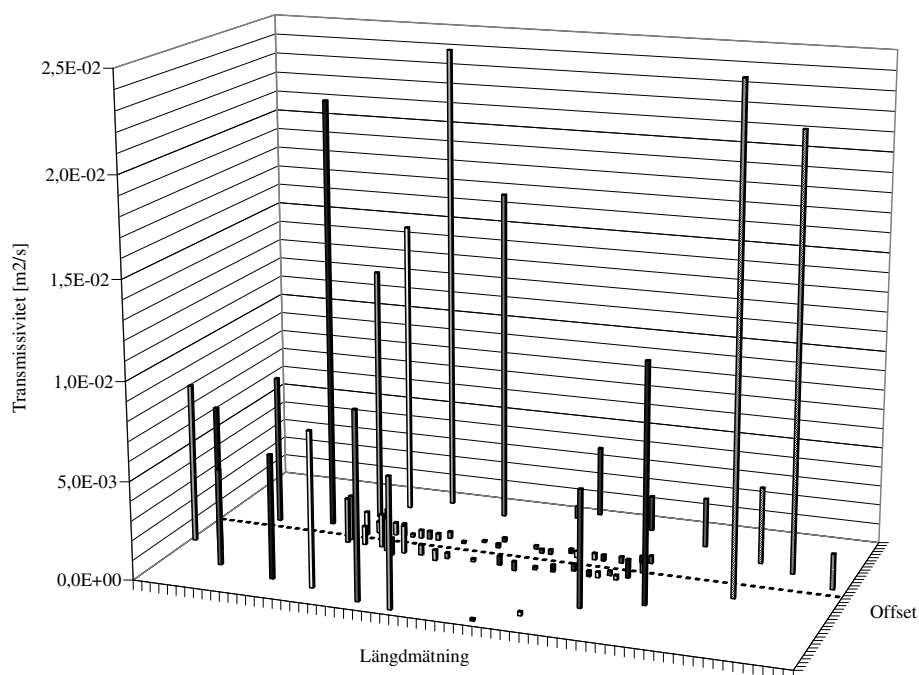
Q = Flöde [m^3/s]

$s_w(\text{uppmätt})$ = Uppmätt avsänkning [m] ("Drawdown")



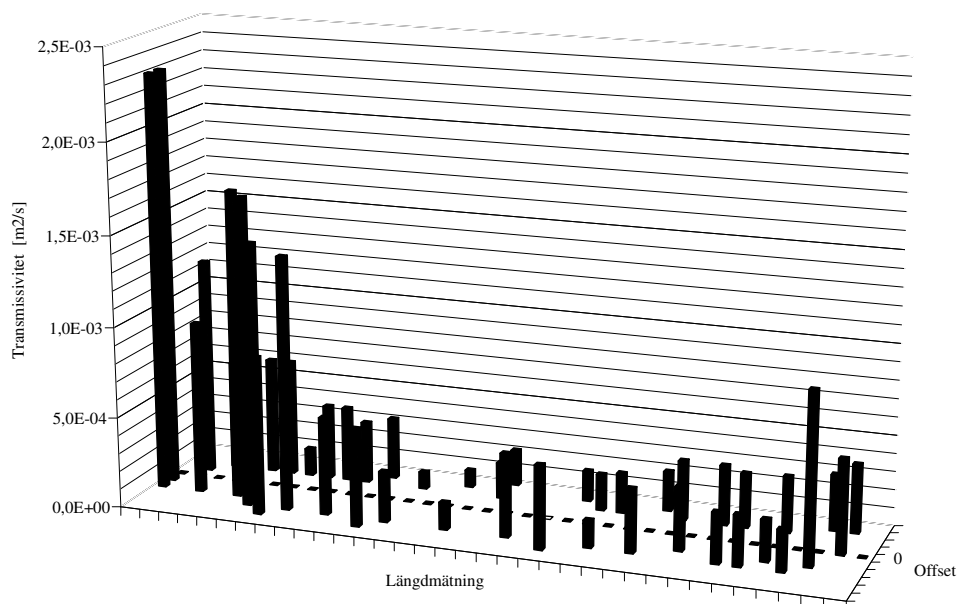
Figur 9.1 Exempel på tid-avsänkingskurvor från provpumpning av grundvatten-systemets brunnar

I dimensioneringsrapporterna [24] och [25] beskrivs utformningen av testerna lite mer i detalj och provpumpningsresultaten finns samlade i rapporten "Provpumpningsresultat Holma och Triangeln" [28]. I figur 9.2 nedan redovisas utvärderad transmissivitet för borrhålen kring station Triangeln. De små T-värdena i den "inre ringen" är mätvärden från pumpbrunnarna och den "yttre ringen" är mätvärden från infiltrationsbrunnarna. Den streckade linjen i mitten åskådliggör järnvägsspårens läge.



Figur 9,2 Uppmäta transmissivitet i grundvattensystemets uttags- och infiltrationsbrunnar

Som figur 9.2 visar så är den uppmätta transmissiviteten i infiltrationsbrunnarna betydligt högre än i uttagsbrunnarna. I figur 9.3 nedan redovisas T-värden för enbart uttagsbrunnarna för att lättare se transmissivitetsfördelningen längs med station Triangeln.



Figur 9,3 Uppmäta transmissivitet i grundvattensystemets uttagsbrunnar

Figur 9.3 visar tydligt att transmissiviteten är högre vid det norra schaktet än vid det södra schaktet.

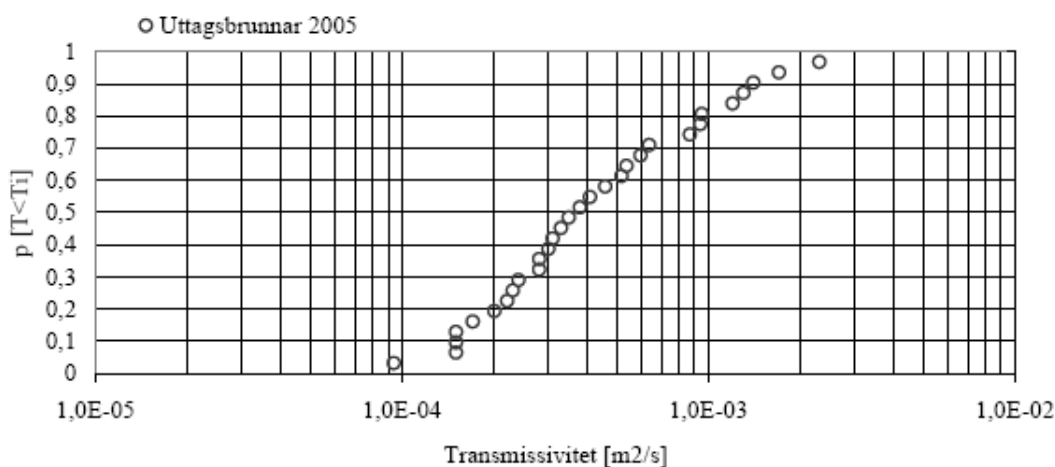
I bilaga 4 redovisas de uppmätta och beräknade parametrarna för varje provpumpad brunn i grundvattensystemet. Nedan redovisas beräknad min, max, medel och median transmissivitet för uttagsbrunnarnas olika avsänkingssteg:

- För "Step 1" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $-8.1 \cdot 10^{-3}$ – $4.8 \cdot 10^{-3}$ m²/s med medelvärdet $2.6 \cdot 10^{-6}$ m²/s och medianen $2.9 \cdot 10^{-4}$ m²/s.
- För "Step 2" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $6.0 \cdot 10^{-5}$ – $2.7 \cdot 10^{-3}$ m²/s med medelvärdet $3.9 \cdot 10^{-4}$ m²/s och medianen $2.4 \cdot 10^{-4}$ m²/s.
- För "Step 3" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $8.1 \cdot 10^{-5}$ – $1.5 \cdot 10^{-3}$ m²/s med medelvärdet $3.9 \cdot 10^{-4}$ m²/s och medianen $2.5 \cdot 10^{-4}$ m²/s.
- För återhämtningssteget "Step 4" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $9.4 \cdot 10^{-5}$ – $2.3 \cdot 10^{-3}$ m²/s med medelvärdet $5.9 \cdot 10^{-4}$ m²/s och medianen $3.7 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

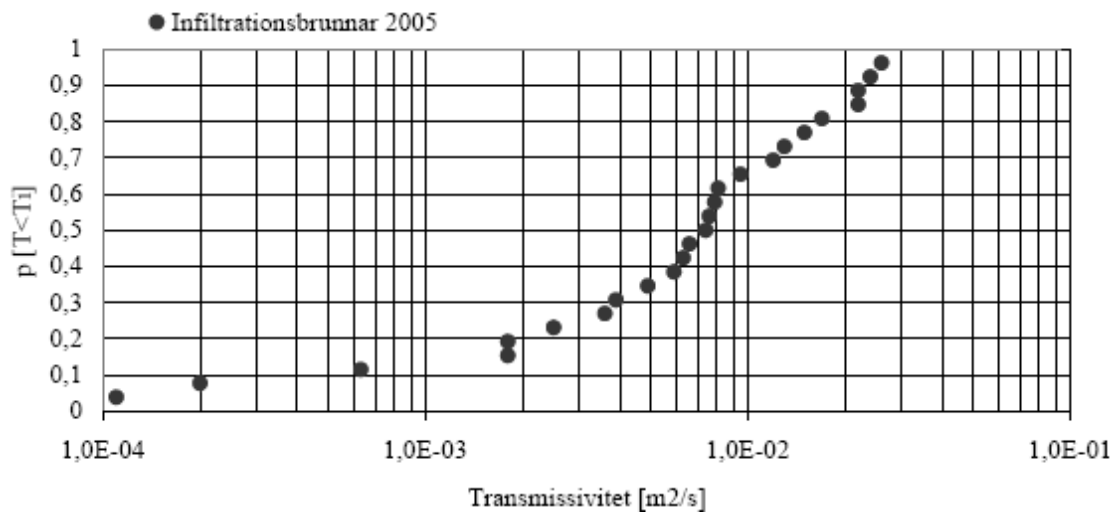
Nedan redovisas beräknad min, max, medel och median transmissivitet för infiltrationsbrunnarnas olika avsänkingssteg:

- För "Step 1" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $-9.1 \cdot 10^{-1}$ – $2.5 \cdot 10^{-1}$ m²/s med medelvärdet $-1.5 \cdot 10^{-2}$ m²/s och medianen $5.3 \cdot 10^{-3}$ m²/s.
- För "Step 2" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $9.9 \cdot 10^{-5}$ – $3.7 \cdot 10^{-2}$ m²/s med medelvärdet $1.2 \cdot 10^{-2}$ m²/s och medianen $6.2 \cdot 10^{-3}$ m²/s.
- För "Step 3" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $1.1 \cdot 10^{-4}$ – $5.7 \cdot 10^{-2}$ m²/s med medelvärdet $1.1 \cdot 10^{-2}$ (m²/s) och medianen $6.4 \cdot 10^{-3}$ m²/s.
- För återhämtningssteget "Step 4" ligger den beräknade transmissiviteten inom intervallet $1.1 \cdot 10^{-4}$ – $2.6 \cdot 10^{-2}$ m²/s med medelvärdet $9.2 \cdot 10^{-3}$ m²/s och medianen $7.4 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

Entreprenören anser att återhämtningssteget "Step 4" är det mest pålitliga av de fyra stegen. I figur 9.4 och 9.5 redovisas de beräknade transmissiviteterna i kumulativa fördelningsdiagram.



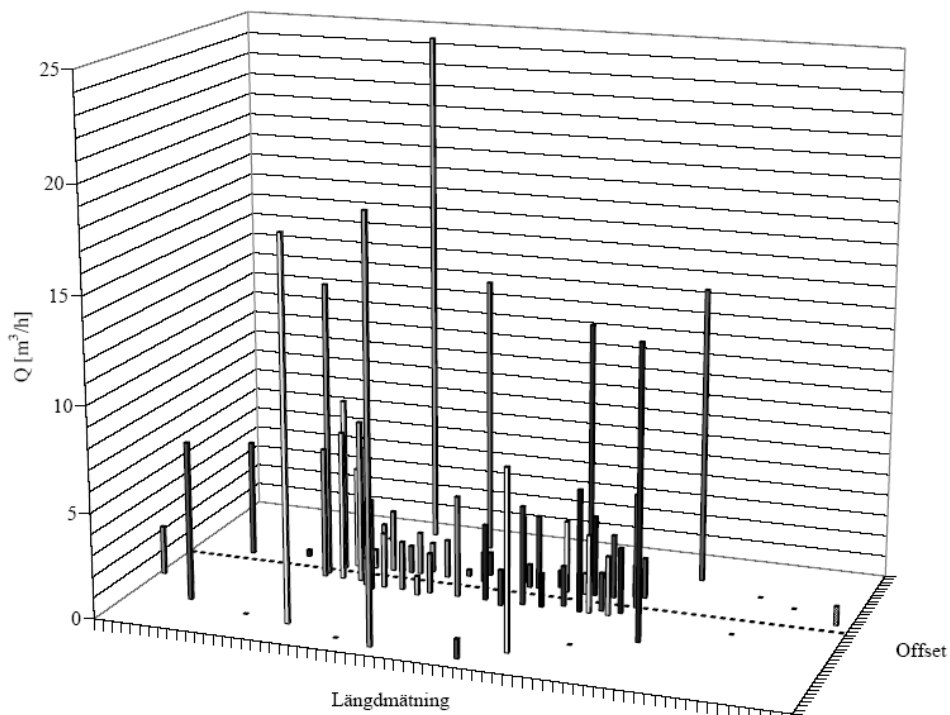
Figur 9.4 Den kumulativa transmissivitetsfördelningen för uttagsbrunnarna 2005



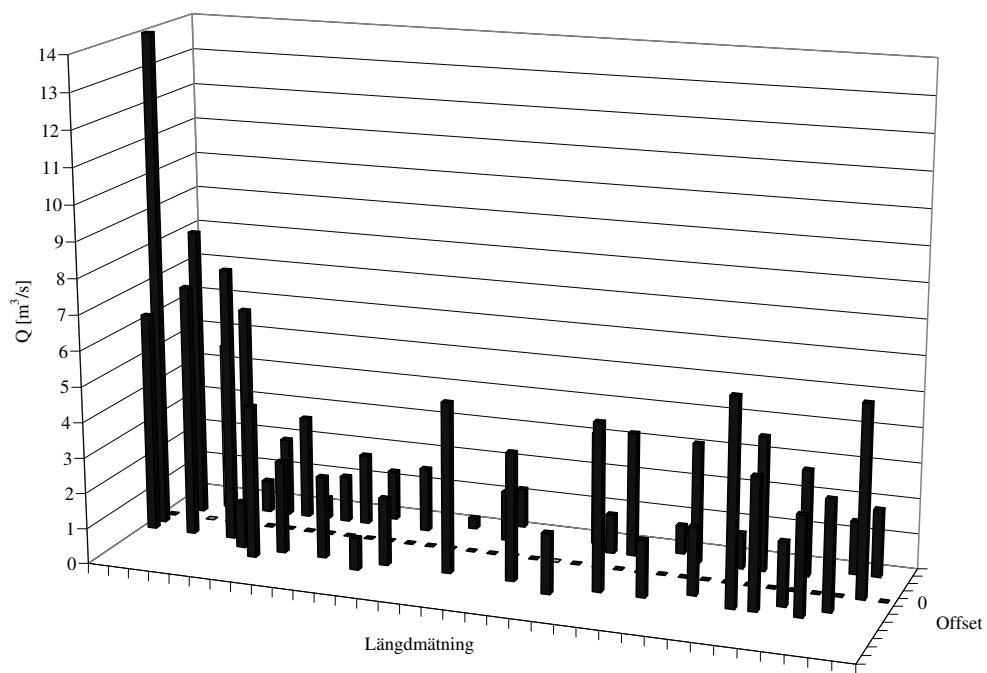
Figur 9.5 Den kumulativa transmissivitetsfördelningen för infiltrationsbrunnarna 2005

9.2 Grundvattensystemets uppmätta flöden

Enligt entreprenörens flödesmätningar pumpar pumpbrunnarna vid station Triangeln cirka $150 \text{ m}^3/\text{h}$, [27]. I bilaga 7 visas flödesdiagram över uttagsbrunnarna vid den södra respektive den norra delen av stationen Triangeln. Som man kan utläsa av diagrammen så är uttagsflödet större i den norra delen. Totalt dräneras cirka $26 \text{ m}^3/\text{h}$ i sumpbrunnar vid Triangeln. Uttags- och återinfiltrationsbrunnarnas utformning kan ses i bilaga 5. Återinfiltrationsflödet i återinfiltrationsbrunnarna har varierat under byggtiden och har vid tillfällena överskridit 100 % infiltrerat vatten från uttagsbrunnarna. Detta har kunnat göras med hjälp av vatten från brandposter. Anledningen till att entreprenören har infiltrerat brandpostvatten är för att klara grundvattennivågränserna vid kontrollbrunnarna. I figur 9.6 nedan redovisas både uttags- och återinfiltrationsflöden och i figur 9.7 visas endast uttagsflöden.



Figur 9.6 Grundvattensystemets uttags- och infiltrationsflöde



Figur 9.7 Grundvattensystemets uttagsflöde

10 Excelbaserad modell

10.1 Modelluppbyggnad

Numeriska grundvattenmodeller är ofta relativt komplicerade i sin uppbyggnad. I detta kapitel presenteras en enklare modell som baseras på flödesekvationer. Modellen, som är uppbyggd i Excel, delar in Triangelområdet i 10x10m celler. Två kalkylblad har kopplats samman varav det ena representerar zon I och det andra zon II. I grunden bygger modellen på att grundvattennivån i en cell (h_0) är lika med de fyra intilliggande cellerna delat med fyra. I detta fall har en läckagekoefficient lagts till vid sammankopplingen av de två kalkylbladen. När man startar en simulering anger man en lösning som inte behöver vara i närheten av den verkliga lösningen. Efter ett antal iterationer med hjälp av en rekursiv funktion får man gradvis bättre lösningar. Exempelvis avslutas iterationen vid en maximal grundvattennivåförändring på 0.001m. Nedan redovisas en kort härledning:

$$\text{Kontinuitetsekvationen} \rightarrow Q_{brunn} + Q_{läckage} + Q_{akvifer} = 0$$

$$Q_{akvifer} = -\frac{h_0 - h_1}{\Delta} \cdot T \cdot \Delta + -\frac{h_3 - h_0}{\Delta} \cdot T \cdot \Delta - \frac{h_0 - h_2}{\Delta} \cdot T \cdot \Delta + \frac{h_4 - h_0}{\Delta} \cdot T \cdot \Delta$$

$$\frac{Q_{akvifer}}{T} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4 \cdot h_0$$

$$Q_{läckage} = \frac{h_0 - h_0'}{b'} \cdot K' \cdot \Delta^2 = (h_0 - h_0') \frac{K'}{b'} \cdot \Delta^2$$

$$\therefore T(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4 \cdot h_0) + \frac{h_0' \cdot K' \cdot \Delta^2}{b'}$$

$$h_0(4 \cdot T + \frac{K' \cdot \Delta^2}{b'}) = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot T + \frac{h_0' \cdot K' \cdot \Delta^2}{b'} + Q_{brunn}$$

$$h_0 = \frac{(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot T + \frac{h_0' \cdot K' \cdot \Delta^2}{b'} + Q_{brunn}}{4 \cdot T + \frac{K' \cdot \Delta^2}{b'}}$$

h_0 = den aktuella cellen

h_1, h_2, h_3, h_4 = de intilliggande cellerna

Kalkylbladen är indelade i 150x150 celler där varje cell är 10x10meter. Det innebär att modellens area är 2 250 000 m² (=2.25 km²). Varje enskild cell är kopplad till det andra kalkylbladets motsvarande cell. Modellens avgränsas av en konstant grundvattennivå som omringar triangelområdet.

Modellen är utformad med samma antal pump- och infiltrationsbrunnar som det verkliga grundvattensystemet, se kapitel 8. Indata till modellen är följande:

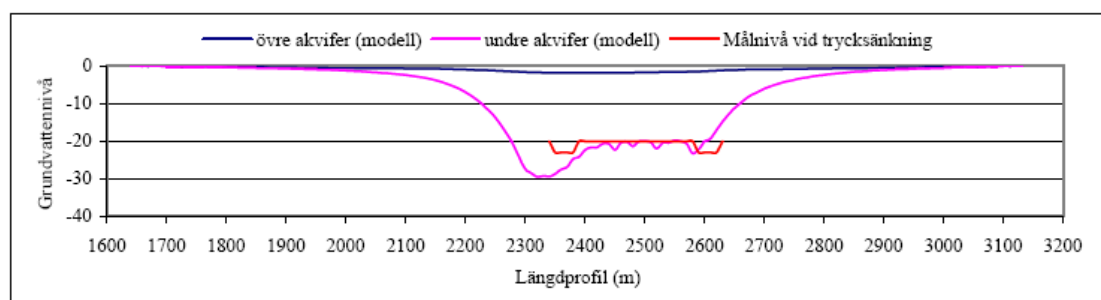
- Transmissivitet i zon I (T_{zonI})
- Transmissivitet i zon II (T_{zonII})
- Läckagekoefficient ($\frac{k'}{b}$)
- Cellstorleken ($\Delta = \Delta x = \Delta y$)
- Brunnsflöden Q_{uttag} , $Q_{infiltr.}$

Syftet med modellen är att beräkna grundvattennivåerna i området med brunnsflöden (Q), och randvillkor.

10.2 Känslighetsanalys

Den Excellbaserade modellen har använts till att utföra en hydrogeologisk känslighetsanalys. Ett antal simuleringar med varierande indata har gjorts för att se hur de olika parametrarna påverkar grundvattennivåerna i Triangelområdet. Vid samtliga simuleringar var uttaget enbart i zon II och infiltrationen både i zon I och zon II. Analysen började med ett försök att hitta indata som beskriver verkligheten så bra som möjligt. Transmissiviteten sattes till $9.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ vilket är ett medianvärde av samtliga provpumpningar och kapacitetstester som gjordes under förundersökningarna i Triangelområdet. Sedan fördelades detta medianvärde till 80 % i zon I och 20 % i zon II. Injekteringsskärmen i zon I kompensades genom att transmissiviteten sänktes med 50 %. Läckagekoefficienten ligger enligt förundersökningarna inom intervallet 10^{-8} - 10^{-9} 1/s och genom ett antal provsimuleringar sattes läckagekoefficienten till 10^{-8} 1/s . Vid referenssimuleringen användes alltså följande indata:

Referenssimulering: $T_{zon I} = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_{zon II} = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\frac{K'}{b} = 1.0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$



Figur 10.1 Utdata från referenssimuleringen av den Excel baserade grundvattenmodellen

I den undre akviferen (zon II) är avsänkningen i norra schaktet cirka -30 m, södra schaktet -20 m och mellan schakten cirka -20 m. Enligt entreprenörens egna utvärderingar ett år efter byggstart är avsänkningen i schakten ~-20 meter medan avsänkningen mellan schakten varierar mellan -11 meter och -18 meter, se referens [27]. Målnivån vid trycksänkning vilket beskrivs i rapporten "Grundvattenmodellering av station Triangeln" [18] kan även ses i figur 10.1. Avsänkningen i referenssimuleringen stämmer bra överens med den verkliga avsänkningen vid Triangeln och målnivån vid trycksänkning. Följande simuleringar har genomförts utöver referenssimuleringen:

Simulering 1: $T_{zon I} = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_{zon II} = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\frac{K}{b} = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ 1/s}$

Simulering 2: $T_{zon I} = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_{zon II} = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\frac{K}{b} = 1.0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$

Simulering 3: $T_{zon I} = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_{zon II} = 9.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\frac{K}{b} = 1.0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$

I *simulering 1* sänktes läckagekoefficienten från 10^{-8} till 10^{-9} 1/s och transmissiviteterna i zon I och zon II var oförändrade i förhållande till referenssimuleringen. Resultatet av förändringen gav en avsänkning i zon II på cirka –40 meter och zon I visade sig få en grundvattennivåhöjning till cirka +2m.

I *simulering 2* var läckagekoefficienten oförändrad, transmissiviteten i zon I var oförändrad och transmissiviteten i zon II höjdes med en faktor 2 till $3.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i förhållande till referenssimuleringen. Resultatet av förändringen gav en avsänkning i zon II på cirka –15 m och i zon I cirka –0.5 m.

I *simulering 3* var läckagekoefficienten oförändrad, transmissiviteten i zon I var oförändrad och transmissiviteten i zon II sänktes med en faktor 2 till $9.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ i förhållande till referenssimuleringen. Resultatet av förändringen gav en avsänkning i zon II till cirka –30 m och i zon I cirka –2.0 m.

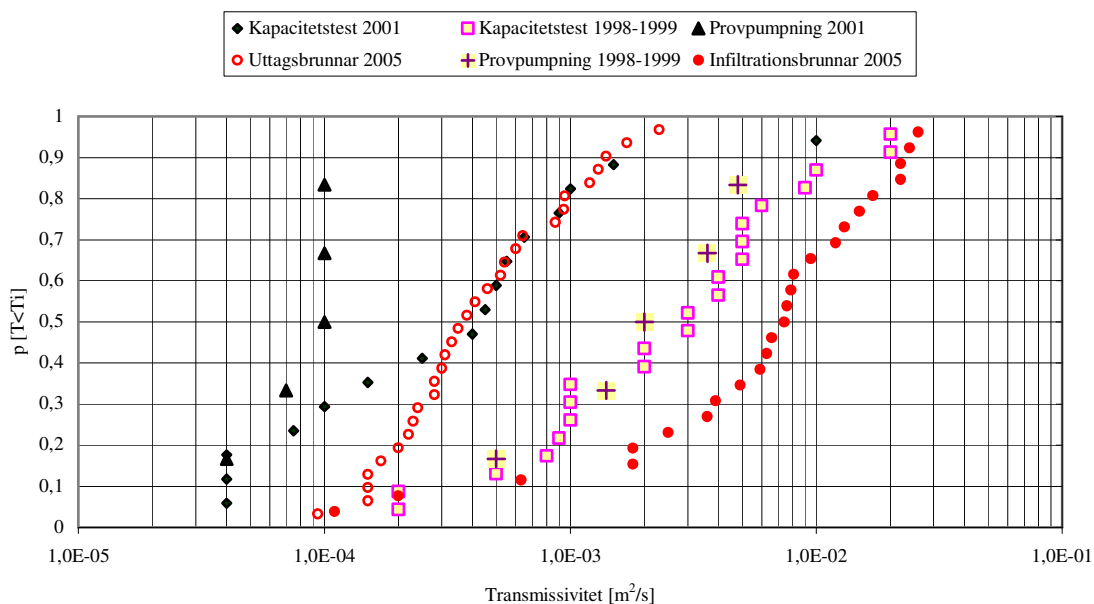
I bilaga 6 redovisas resultaten för referenssimuleringen och de olika simuleringarna i form av diagram.

11 Jämförelse av förundersökningsresultat och verkligt utfall

11.1 Hydrauliska egenskaper

För att på ett enkelt sätt redovisa och jämföra de olika förundersökningsresultaten plottas de utvärderade transmissiviteter i ett kumulativt fördelningsdiagram. I figur 11.1 nedan visas fördelningsfunktioner av transmissivetsdata för de olika förundersökningarna. Följande fördelningsfunktioner av transmissivetsdata redovisas i figur 11.1:

- Kapacitetstest under åren 1998-1999 (*zon I + II + III*)
- Provpumpning under år 1998-1999 (*zon I + II + III*)
- Kapacitetstester under år 2001 (*zon II och zon I + II*)
- Provpumpning under år 2001 (*zon II*)
- Provpumpning av uttagsbrunnar under år 2005 (*zon II*)
- Provpumpning av infiltrationsbrunnar under år 2005 (*zon I + II*)



Figur 11.1 Fördelningsfunktioner av transmissivetsdata för de olika förundersökningarna.

Det kumulativa fördelningsdiagrammet, figur 11.1, visar tydliga skillnader mellan de olika fördelningsfunktionerna. Provpumpningarna under 1998/99 stämmer ganska bra överens med kapacitetstesterna under samma period. De kompletterande propvumpningarna under 2001/02 avviker ganska mycket från kapacitetstesterna. Provpumpning av grundvattenssystemets uttags- och infiltrationsbrunnar under år 2005 visar väldigt stora skillnader. Dessa brunnar har propvumpats och utvärderats på precis samma sätt. Det bör poängteras att fördelningsfunktionerna bygger på transmissiviteternas medelvärden då medianvärden inte funnits tillgängliga.

11.2 Uttags- och infiltrationsflöden

Det har visat sig att pumpflödet i uttagsbrunnarna är mindre än vad förundersökningarna förespådde. Jämförelse av MIKE SHE modellens beräknade uttagsflöde och det verkliga utfallet kan ses i tabell 11.1 och figur 11.2.

Det verkliga utfallet baseras på flödesmätningar utförda av entreprenören och är medelvärden under perioden 2006-01-02 till 2006-08-29.

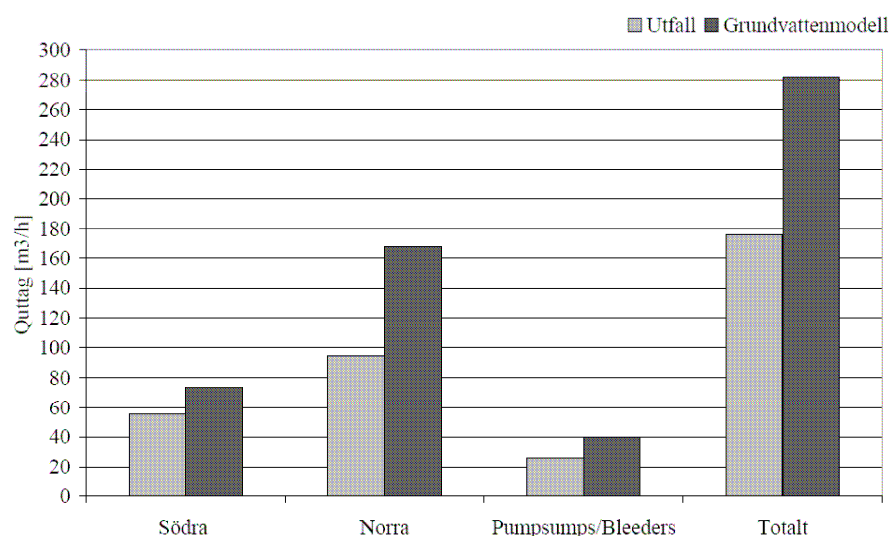
Grundvattenmodellens resultat är tagna efter en byggperiod på 1 år. Dock motsvarar dessa resultat i princip stationära förhållanden, vilket innebär att resultaten kan anses gälla även för längre perioder [18].

Både grundvattenmodellen och det verkliga utfallet visar att uttaget är störst i det nordliga schaktet. Differenserna mellan grundvattenmodell och verkligt utfall vid station Triangeln är följande:

- Vid det nordliga schaktet är det verkliga uttaget 43 % mindre än vad grundvattenmodellen visar
- Vid det södra schaktet är uttaget 23 % mindre än vad grundvattenmodellen visar
- Det totala verkliga pumpflödet är 38 % mindre än vad grundvattenmodellen visar

Tabell 11.1 Jämförelse av pumpflöden i uttagsbrunnar mellan grundvattenmodell och verkligt utfall

	$Q_{\text{Utfall}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$Q_{\text{modell}} [\text{m}^3/\text{s}]$
Södra	55	74
Norra	95	168
Pumpsumps	26	*
Bleeders	*	40
Totalt	176	282



Figur 11.2 Jämförelse av uttag mellan grundvattenmodell och verkligt utfall

12 Diskussion och slutsats

12.1 Uttags- och infiltrationsflöden

Efter cirka ett års arbete med utgrävningen av station Triangeln har det visat sig att kalkberget är torrare än vad man beräknat. Både Mike She modellen och verkligt utfall visar att uttaget är större i norra schaktet än i södra schaktet. Geologi och hydrogeologi är som bekant ingen exakt vetenskap, osäkerheterna är många och det är naturligtvis så att provborrningarna endast visar förhållandena just där man borrar. I detta fall leder osäkerheterna till att arbetet vid Triangeln går lättare än vad man tänkt sig.

En tänkbar anledning till skillnaden i flödesmängd mellan grundvattenmodell och verkligt utfall kan vara brunnarnas utformning. Grundvattenmodellens uttagsbrunnar är utformade så att de pumpar i både zon I och zon II. I zon I beräknade man att pumpa $77 \text{ m}^3/\text{h}$ och i zon II beräknade man att pumpa $165 \text{ m}^3/\text{h}$, se kapitel 8,3. Meningen är att även grundvattensystemets uttagsbrunnar skall pumpa i zon I och II men detta kan diskuteras. I bilaga 5 redovisas uttagsbrunnarnas principiella utformning. Samtliga uttagsbrunnar är utformade med ett 5 meter filter i nedre änden av brunnen och den resterande delen består av ett PVC rör. Ett grusfilter täcker hela brunnen vilket skapar hydraulisk kontakt mellan uttagsbrunnens pump och det omgivande kalkberget längs med hela brunnen. Detta grusfilter kan sättas igen vilket gör att man i princip bara pumpar i zon II, se kapitel 12.2 för vidare förklaring. Detta innebär att det kan finnas grundvatten kvar i kalkberget ovanför Triangelns bergrum.

12.2 Hydrauliska egenskaper

Det kumulativa fördelningsdiagrammet, figur 11.1, visar tydliga skillnader mellan de olika fördelningsfunktionernas transmissiviteter.

Provpumpningarna och kapacitetstesterna från 1998/99 stämmer ganska bra överens. Detta kan bero på att både de provpumpade brunnarna och de kapacitetstestade brunnarna verkar på samma nivåer i kalkberget.

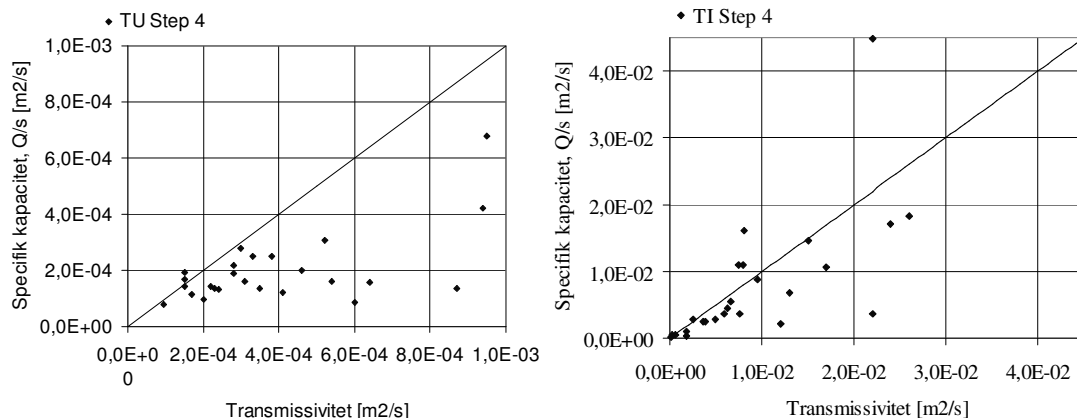
Provpumpningarna och kapacitetstesterna från 2001/02 skiljer sig dock en del. Kapacitetstesternas medianvärde är $4.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ och provpumpningarnas medianvärde är $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Provpumpningsbrunnarna täckte endast den låggenomsläppliga zon II och kapacitetstestbrunnarna täckte både zon I och zon II förutom fem brunnar som enbart täckte zon II, se tabell 1 i bilaga 1 och tabell 1 i bilaga 3. Detta bör vara anledningen till att fördelningskurvorna skiljer sig åt.

Det kumulativa fördelningsdiagrammet, figur 11.1, visar ganska stora skillnader mellan 1998/99 och 2001/02 års förundersökningar. Detta beror antagligen på skillnaden i borrhålsdjup. Flera av borrhålen från 1998/99 sträcker sig ner till nivåer 40 meter eller djupare och tränger därmed in i zon III. Borrhålen från 2001/02 sträcker sig högst ner till -30 meter och har därför antagligen inte nått zon III. Uttags- och infiltrationsbrunnarna sträcker sig till cirka -32 meter och har därmed heller inte nått zon III.

Som figur 9.2 visar så är den uppmätta transmissiviteten i infiltrationsbrunnarna betydligt högre än i uttagsbrunnarna. Denna stora skillnad åskådliggörs även i det kumulativa fördelningsdiagrammet, figur 11.1. Det kan finnas flera olika anledningar till denna stora skillnad i beräknad transmissivitet. En anledning kan vara att uttagsbrunnarna helt enkelt pumpar i en lägre genomsläpplig geologi än vad infiltrationsbrunnarna gör. Detta skulle innebära att Triangeln byggs i en lågpermeabel ö. Detta kan dock inte styrkas av förundersökningarna. Utagsbrunnarna är placerade innanför och förhållandevis nära injekteringsskärmen. Infiltrationsbrunnarna är placerade utanför och lägre ifrån injekteringsskärmen än vad uttagsbrunnarna är. Injekteringen sträcker sig vertikalt från cirka +2 till -10 alltså hela zon I och har ett avstånd från konstruktionen på cirka 15-100 meter. Injekteringen antas ha en tjocklek på 2 meter och tester visar att konduktiviteten är $1.8 \cdot 10^{-6}$ – $3.5 \cdot 10^{-6}$, se ref [26]. Enligt DHI [18] är grundvattenströmningen huvudsakligen horisontell vid avstånd större än 50 meter från konstruktionen. Närmre konstruktionen ökar den vertikala strömningen vilket forcerar vatten ner till uttagsbrunnarna vilket i sig minskar injekteringens effekt. I Mike She modellen har avståndet till uttagsbrunnarna optimerats. Till följd av en välfungerade injekterings-skärm i det verkliga grundvattensystemet kan man säga att uttagsbrunnarna pumpar i en annan geologi än vad infiltrationsbrunnarna gör.

Sannolikt är den vertikala konduktiviteten lägre än vad man förutspått vilket också medför ett mindre uttag. I kapitel 10.2 visas att läckagekoefficienten har stor betydelse för grundvattensänkningen i både zon I och zon II. Enligt förundersökningarna ligger läckagekoefficienten (K'/b') inom intervallet 10^{-9} – 10^{-8} [1/s]. Läckagekoefficienten kan definieras som kvoten mellan den vertikala hydrauliska konduktiviteten (K') och det läckande lagrets mäktighet (b'). För att utvärdera K' multipliceras K'/b' med lagrets mäktighet (b') vilket kan antas vara cirka 20 meter, se figur 7.2. Den vertikala konduktiviteten i zon II kan då beräknas ligga inom intervallet $2 \cdot 10^{-8}$ – $2 \cdot 10^{-7}$ [m/s]. I Mike She modellen antas den vertikala konduktiviteten ha ett median värde på $6 \cdot 10^{-7}$ [m/s] och ligga inom intervallet $1 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ [m/s], se DHI [18]. Den vertikala konduktiviteten är alltså högre i Mike She modellen än vad förundersökningarna visar. Detta stärker resonemanget om att den verkliga vertikala konduktiviteten är lägre än vad man förutspått i Mike She modellen.

En annan anledning till den stora skillnaden mellan uttags- och infiltrationsbrunnarna kan vara att uttagsbrunnarna har en betydande skinfaktor. En metod att utvärdera brunnars skinfaktor är att plotta den beräknade transmissiviteten i relation till den specifika kapaciteten, se kapitel 4.5.2. I bilaga 4 figur 1 och 2 ställs transmissivitet i relation till specifik kapacitet med data ifrån provpumpning av grundvattenssystemets uttags- och infiltrationsbrunnar. Provpumpningen gjordes i fyra steg varav ”Step 1-3” är avsänkning och ”Step 4” är återhämtning. Entreprenören har bedömt att återhämtningsfasen är den mest pålitliga av de fyra stegen. I figur 12.1a och 12.1b ställs transmissivitet i relation till specifik kapacitet för återhämtningsfasen. Observera skalorna i de två diagrammen nedan.

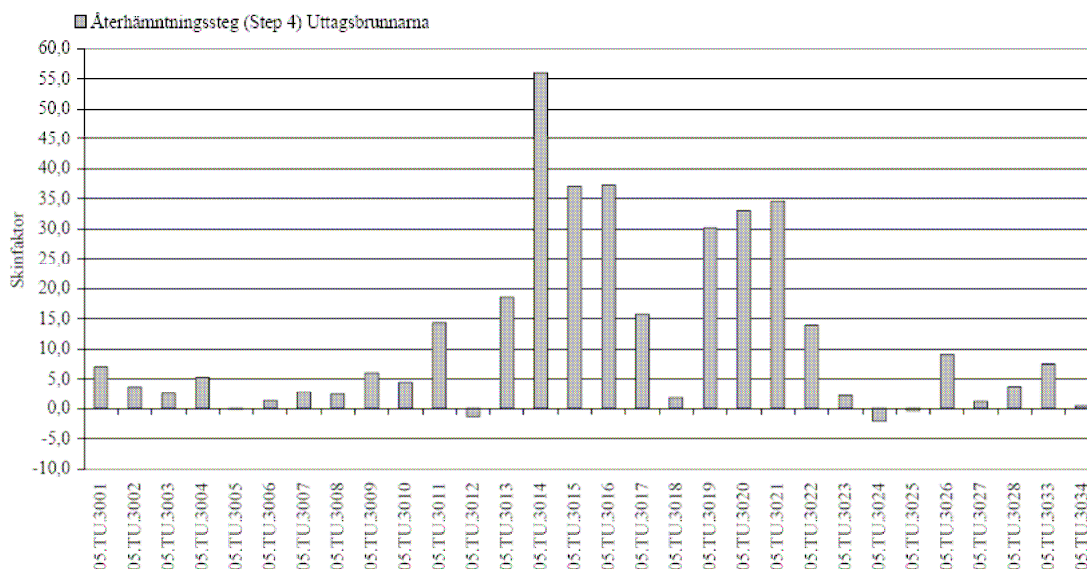


Figur 12.1 Transmissivitet i relation till specifik kapacitet a) Uttagsbrunnar b) infiltrationsbrunnar. De svarta strecken åskådliggör 1:1 förhållanden mellan specifik kapacitet och transmissivitet.

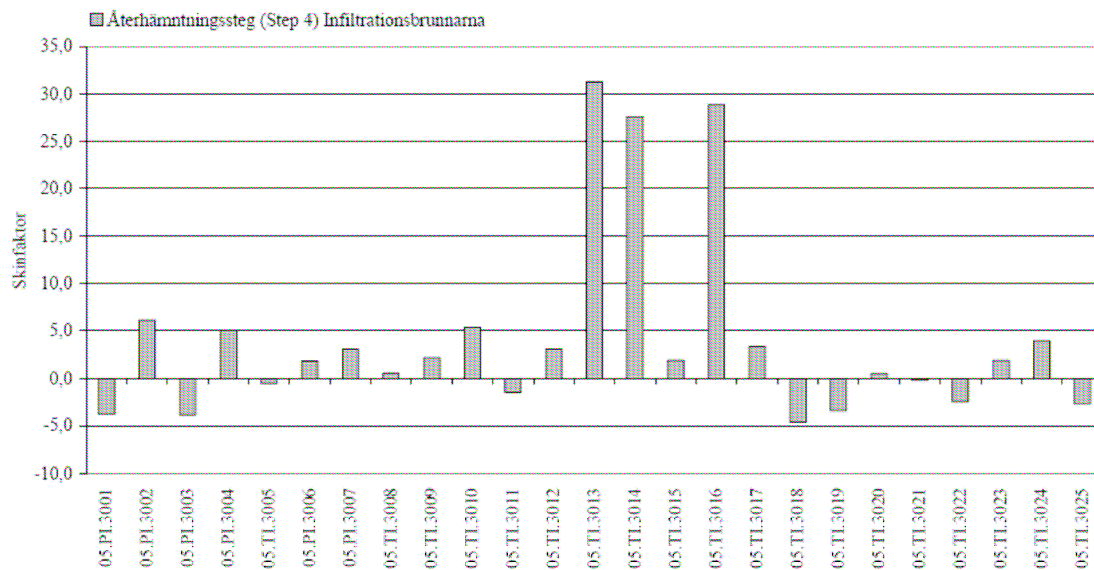
Figur 12.1a visar att den beräknade transmissiviteten är betydligt högre än den specifika kapaciteten i uttagsbrunnarna. Detta kan vara ett tecken på att brunnarna har hög skinfaktor. Denna skinfaktor kan bero på brunnens utformning med grusfilter längs hela brunnen och ett 5 meter filter i brunnens underkant, se bilaga 5.

Figur 12.1b visar att den beräknade transmissiviteten stämmer ganska bra överens med den specifika kapaciteten. Infiltrationsbrunnarnas filter sträcker sig längs hela brunns längden, se bilaga 5.

I figur 12.2a och 12.2b redovisas beräknade skinfaktorer för uttags- och infiltrationsbrunnarnas återhämtningssteg. Skinfaktorerna har beräknats med ekvationerna (7) och (10) i kapitel 4.5.2.



Figur 12.2a Skinfaktorer för uttagsbrunnarnas återhämtningssteg



Figur 12.2b Skinfaktorer för infiltrationsbrunnarnas återhämtningssteg

I kapitel 4.5.2 beskrivs att avsänkningen i en ofullständig eller något igensatt brunn kan avvika något från det teoretiska. Vid ett resonemang kring ekvationerna (7), (9) och (10) i kapitel 4.5.2 kan följande konstateras:

Om avsänkningen ökar i ekvation (7) sänks κ vilket leder till en större skinfaktor, ξ , se ekvation (10). Vid en omskrivning av ekvation (9) finner vi följande:

$$T = \frac{Q}{s} \cdot \frac{7 + \xi}{2\pi} \quad (12)$$

Detta betyder att om skinfaktorn, ξ , minskar i ekvation (12) så minskar även transmissiviteten. Figuren 12.2a och 12.2b visar att skinfaktorerna överlag är lägre för infiltrationsbrunnarna än för uttagsbrunnarna. Skinfaktorn har inte tagits med i utvärderingen av transmissiviteten för grundvattensystemens brunnar, se ekvation (11) kapitel 9.2. Transmissivitets skillnaden mellan uttags- och infiltrationsbrunnarna kan förklaras genom ovanstående resonemang. Denna skillnad kan bero på att uttagsbrunnarna är utformade med ett 5 meter filter i nedre änden och infiltrationsbrunnarna är utformade med ett 30 meter filter längs med hela brunnen.

12.3 Excelbaserad modell

Slutsatser man kan fatta utav den Excelbaserade känslighetsanalysen, se kapitel 10.2, är att de angivna hydrauliska parametrarna har stor betydelse för resultatet. Det skall poängteras att vid samtliga simuleringar var uttaget endast i zon II och infiltrationen i både zon I och zon II.

Modellen användes för att simulera fram hydrologiska parametrar utifrån givna uttags- och infiltrationsflöden. Genom ett resonemang som redogörs i kapitel 10.2 visade det sig att följande parametrar stämmer bra överens med verkligheten:

$$T_{zon I} = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, T_{zon II} = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, \frac{k^*}{b^*} = 1.0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$$

Känslighetsanalysen visar hur känsliga de olika parametrarna är för resultatet. I rapporten *"Underlagsrapport för tillståndprocessen, Sammanställning över utförda förundersökningar"* [13] redovisas exempelvis att läckagekoefficienten ligger inom intervallet 10^{-8} - 10^{-9} 1/s. I simulering 1 sänktes läckagekoefficienten från 10^{-8} till 10^{-9} 1/s. Denna förändring gjorde att avsänkningen ökade i zon II från cirka -20 meter till cirka -30 meter och i zon I höjdes grundvattennivån från cirka -1,5 meter till +2 meter. I simulering 2 och 3 åskådliggjordes att en höjning av transmissiviteten ger en minskad avsänkning och minskning av transmissiviteten ger ökad avsänkning.

12.4 Rekommendationer

Resonemanget i denna rapport tyder på att resultaten från förundersökningarna ger en bra bild över Triangelområdets hydrogeologi. Orsaken till skillnaderna i uppmätt transmissivitet vilket åskådliggörs i det kumulativa fördelningsdiagrammet, figur 11.1, klargörs i kapitel 12.2. Likväl skiljer sig Mike She modellens modellerade flöden ifrån de verkligt uppmätta flödena i grundvattensystemets brunnar. Denna avvikelse är sannolikt inte orsakad av fel i förundersökningarnas analys av de hydrologiska egenskaperna. Orsaken ligger snarare i själva utförandet av grundvattensystemet. Exempelvis så visar denna rapport att uttagsbrunnarnas utformning med ett 5 meter filter i nedre delen av brunnen medför att brunnarna får en betydande skinfaktor vilket påverkar brunnarnas uttagsskapacitet. En lyckad injekteringsskärm och en lägre vertikal konduktivitet än förväntat är sannolikt också en orsak till att uttaget är mindre än förväntat.

Ett problem vid jämförelsen av transmissivitet mellan de olika propumpningarna är att inte medianvärden funnits tillgängliga, med undantag från borrhålen 99.6.321 och 99.6.323. Detta kan medföra en någon missvisande bild av förundersökningarna. Anledningen till att hydrauliska parametrar har redovisats i intervall, se referens [13], är för att propumpningarna har utvärderats med olika metoder och flera avsänkingssteg. Alla rådata finns arkiverade hos konsulten och för att gå vidare med analysen av förundersökningarna bör dessa gås igenom.

Denna rapport visar att det på ett relativt enkelt sätt går att bygga upp grundvattenmodeller i Excel. Resultaten blir naturligtvis inte så exakta på grund av alla antaganden och förenklingar. Likväl kan Excelmodeller ge en god uppfattning om ett områdes grundvattenförhållanden. Även MIKE SHE modellens resultat innehåller en mängd osäkerheter. Det är viktigt att förstå att dessa modeller enbart ger en uppskattning av verkligheten och att modellernas resultat måste granskas kritiskt.

Detta examensarbete visar även att brunnsutformningen kan ha stor betydelse vid bestämning av hydrologiska parametrar. Brunnsutformningen bör anpassas för varje enskilt fall för att få en så optimal lösning som möjligt.

13 Referenser

- [1] Andersson H Olof, 1981, *Borrning och dokumentation, Borrningsteknik jämte metodik för geologisk datainsamling under borrningens gång*, Lunds Universitet, Lund
- [2] Agerstrand Torgny, Gustafson Gunnar, 1980, *Norra Botkyrka – infiltration för att motverka grundvattensänkning*, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
- [3] Axelsson Carl-Lennart, 2000, *Grundvattensänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar*, SKB, R-00-21
- [4] Bergman G A Sten, Carlsson Anders, 1988, *Site Investigation in Rock – Investigations, prognoses, reports – recommendations*, BeFo 86:2/88, Stockholm
- [5] Blomquist Thorsten, Gustafson Gunnar, Maripuu Peeter, 1985, *Groundwater in rock - Geohydrological investigation methods for installations in rock*, Swedish Council for Building Research, Stockholm
- [6] Citytunnelprojektet, 2002, *Evaluation of Georelated Matters, EVA Group C, Geohydrology, Evaluation of Test Pumping along the Tunnel*, DHI Water and Enviroment
- [7] Citytunnelprojektet, 2002, *Evaluation of Georelated Matters, EVA Group C, Geohydrology, Update and re-calibration of numerical geohydrological model for Malmö Citytunnel*, DHI Water and Enviroment
- [8] Citytunnelprojektet, 2002, SWECO COWI JV. *Supplementary Geotechnical Investigations and Malmö C Test Pit. Factual Report No 7. Hammer Borings along the Tunnel. GT 67 GD 400 0044, Rev A2, 2002*
- [9] Citytunnelprojektet, 2002, SWECO COWI JV. *Supplementary Geotechnical Investigations and Malmö C Test Pit. Factual Report No 8. Test Pumpings at Triangeln GT 67 GD 400 0046, Rev A, 2002-06-15*
- [10] Citytunnelprojektet, 2002, SWECO COWI JV. *Supplementary Geotechnical Investigations and Malmö C Test Pit. Factual Report No 9. Test Pumpings along the Tunnel GT 67 GD 400 0047, Rev A, 2002-03-30*
- [11] Citytunnelprojektet, 2001, *Underlagsrapport för tillståndsprocessen, Vattenverksamhet enligt miljöbalken, Station Triangeln, Kv Priorn/Kaninen*, Sweco VBB VIAK AB
- [12] Citytunnelprojektet, *Underlagsrapport för tillståndsprocessen, Geologiska förhållanden i Malmöregionen*
- [13] Citytunnelprojektet, 2002, *Underlagsrapport för tillståndsprocessen, Sammanställning över utförda förundersökningar*
- [14] Citytunnelprojektet, 2002, SWECO COWI JV. *Evaluation of Georelated Matters, Group C. Evaluation of Capacity Tests along the Tunnel. CTP CT 67 GD 400 0066, Rev A1, 2002-04-28*
- [15] Carlsson Leif, Gustafson Gunnar, 1997, *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*, Chalmers Tekniska Högskola, Geologiska institutionen, Göteborg

- [16] DGI, 1999, *Citytunneln, Boring Campaign 1998, Ground Water Investigations, Report No 1*, Danish Geotechnical Institute.
- [17] DGI, 1998, *Citytunneln, Boring Campaign 1998, Geotechnical Investigations, Ground Investigation Report, Report No 1*, Danish Geotechnical Institute.
- [18] DHI Water & Environment, 2003, *Grundvattenmodellering av station Triangeln, Citytunnelprojektet*
- [19] Franklin Ida, 2005, *Jämförelse av beräknad och verklig grundvattensänkning vid vägportar*, Examensarbete, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet, Uppsala
- [20] Gustafson Gunnar, 1986, *Geohydrologiska förundersökningar i berg – Bakgrund – metodik – användning*, BeFo 84:1/86, Stockholm
- [21] Lindblom Ulf, 2001, *Bergbyggnadsteknik*, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg
- [22] Lindén Per, 2005, *Val av borrhklass kopplat till MWD, bergklass samt vattenflöde vid projektet Hallandsås*, Examensarbete, Avdelning för bergmekanik, Luleå Tekniska Universitet, Luleå
- [23] Lundmark Annika, 2001, *Analys av grundvattennivåer vid undermarksbyggande i urban miljö*, Examensarbete, Institutionen för Mark- och Vattenteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- [24] Malmö Citytunnel group, 2005, *Dimensioning Report – Phase 2, Triangeln, Temporary groundwater lowering, Drilling and completion procedures*, Malmö
- [25] Malmö Citytunnel group, 2005, *Dimensioning Report – Phase 2, Triangeln, Temporary groundwater lowering, Description of system/design*, Malmö
- [26] Malmö Citytunnel Group, 2005, *Temporary Groundwater Lowering, Evaluation of test trial cut off, test pit B & C Triangeln*
- [27] Malmö Citytunnel Group, 2006, *Triangel Station, Pillar tunnel temporary works Asseement of geology, hydrogeology and structural behaviour of rock during tunnel drive*
- [28] Malmö Citytunnel Group, 2005, *Citytunneln – E201 – Tunnlar och Bergrum, Provpumpningsresultat Holma och Triangeln*
- [29] Malmö Stad, 2000, *Malmö Grundvatten, Miljöförvaltning*
- [30] Singhal B.B.S, Gupta R.P., 1991, *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, India
- [31] Citytunnelprojektet, 2002, *Miljökonsekvensbeskrivning till "Citytunnelbanan och förbindelsespår vid Vintrie" samt "Förbindelsespår vid Lockarp"*, Malmö
- [32] Citytunnelkonsortiet, 2001, *Grundvattenmodellering av scenarier för citytunneln*, DHI
- [33] VBB VIAK (2000) *Provpumpning av brunnarna 99-6-321 och 99-6-323 vid Triangeln i Malmö*
- [34] Citytunnelprojektet, 2002, *Evaluation of Georelaterad Matters, EVA Group C, Geohydrology, Evaluation of Airlift capacity and MWD data*, SWECO COWI JV
- [35] Malmö Citytunnel group, 2005, *Planning Report – Phase 2, Triangeln, Temporary groundwater lowering*, Malmö

14 Bilageförteckning

Bilaga 1 Provpumpning vid station Triangeln

Bilaga 2 Kapacitetstester 1998/99

Bilaga 3 Kapacitetstester 2001/02

Bilaga 4 Provpumpning av grundvattensystemets brunnar

Bilaga 5 Brunnsutförande

Bilaga 6 Resultat från Excelbaserad modell

Bilaga 7 Grundvattenflöden vid Triangeln

Bilaga 1 Provpumpning vid station Triangeln

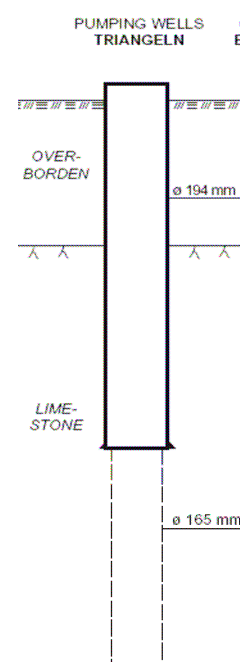
Tabell B1-1 Sammanställning över beräknade transmissiviteter för genomförda provpumpningar under perioden 1998-1999

Brunn	Metodik J = Jacobs, TW = Theis-Walton	Transmissivitet [m^2/s]			
		Min	Max	Medel	Median
99.6.321	(J) Tid-avsänkning/återhämtning	7,7E-05	6,1E-03	1,2E-03	6,1E-04
99.6.321	(TW) Avstånd-avsänkning/Återhämtning	1,0E-04	1,2E-04	1,1E-04	1,1E-04
99.6.323 (1)	(J) Tid-avsänkning/återhämtning	1,8E-04	9,3E-04	4,6E-04	4,8E-04
99.6.323 (1)	(TW) Avstånd-avsänkning/Återhämtning	2,3E-04	4,3E-04	3,0E-04	2,4E-04
99.6.323 (2b)	(J) Tid-avsänkning/återhämtning	4,2E-05	9,5E-03	3,6E-03	2,4E-03
98.1.303	(J) Tid-avsänkning/återhämtning	*	8,4E-03	2,0E-03	*
98.1.304	(J) Tid-avsänkning/återhämtning	1,0E-04	1,1E-03	4,8E-03	*

* värde saknas

Tabell B1-2 Sammanställning av provpumpningarna under perioden 2001-2002 och transmissiviteten i tabellen är beräknade medelvärden.

Brunn	Metodik, TR=Theis-Ramey	Transmissivitet [m^2/s]
01.6.3027	(TR) Tid-avsänkning/återhämtning	1,0E-04
01.6.3028	(TR) Tid-avsänkning/återhämtning	1,0E-04
01.6.3031	(TR) Tid-avsänkning/återhämtning	7,0E-05
01.6.3032	(TR) Tid-avsänkning/återhämtning	4,0E-05
01.6.3033	(TR) Tid-avsänkning/återhämtning	1,0E-04



FigurB-1 Principiell brunnsdesign för provpumpningarna 2001/02

Bilaga 2 Kapacitetstester 1998/99

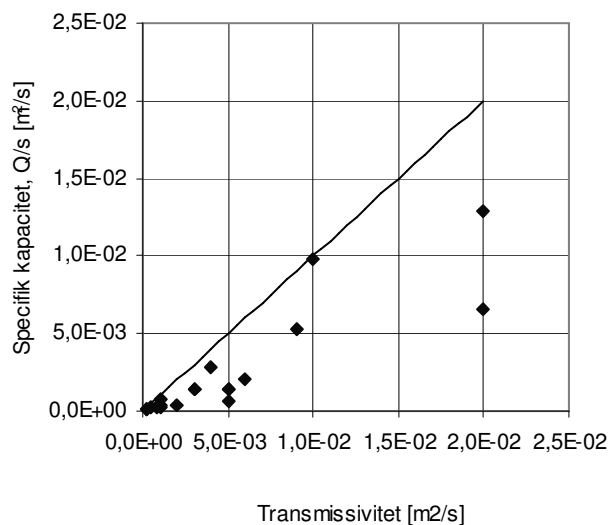
Tabell B2-1 Olika parametrar från 1998-1999 års kapacitetstester

Borrhål	Q [m³/h]	s _w [m]	Q/s [m²/s]	T [m²/s]	F.Ö [m]	F.U [m]	L [m]	Längdmätning [m]
HB3	*	*	*	4,0E-03	-3,2	-33,6	30,4	2302
HB12	*	*	*	2,0E-02	-2,1	-33,1	31	2414
98.1.204	17,5	3,4	1,4E-03	3,0E-03	-3,9	-44,7	40,8	2505
98.1.205	26,2	1,1	6,6E-03	2,0E-02	-0,5	-46,9	46,4	2263
98.1.206	5,3	13,8	1,1E-04	2,0E-04	-2,6	-48,9	46,3	2106
98.1.232	20,4	0,44	1,3E-02	2,0E-02	2	-33,7	35,7	2572
98.1.233	9,4	10,3	2,5E-04	1,0E-03	1	-36,2	37,2	2535
98.1.234	11,5	1,53	2,1E-03	6,0E-03	1,1	-36,4	37,5	2450
98.1.235	2,9	1,12	7,2E-04	1,0E-03	1,3	-36,8	38,1	2375
98.6.303	10,4	10,8	2,7E-04	8,0E-04	-0,8	-48,7	47,9	2616
98.6.304	10,6	0,3	9,8E-03	1,0E-02	1,3	-50,6	51,9	2120
98.6.314	9,4	7	3,7E-04	1,0E-03	-2,4	-41,7	39,3	2596
99.1.238	3,6	9,7	1,0E-04	2,0E-04	-2	-38	36	2564
99.1.239	11,3	1,1	2,9E-03	4,0E-03	-0,5	-39,3	38,8	2361
99.6.321	9,7	11,8	2,3E-04	5,0E-04	0,4	-39	39,4	2568
99.6.322	11,5	0,61	5,2E-03	9,0E-03	-2,2	-40,3	38,1	2441
99.6.323	16,7	7,9	5,9E-04	5,0E-03	-2,2	-39,2	37	2357
99.6.324	9	7,5	3,3E-04	9,0E-04	-2,8	-36,4	33,6	2700
99.6.325	18,5	3,5	1,5E-03	5,0E-03	-5	-38,5	33,5	2474
99.6.326	16,5	3,2	1,4E-03	5,0E-03	-4,8	40,1	-44,9	2432
99.6.327	15,5	11,4	3,8E-04	2,0E-03	-5,1	-38,7	33,6	2367
99.6.329	17,3	3,3	1,5E-03	3,0E-03	-2,9	-39,7	36,8	2236
min			1,0E-04	2,0E-04				
max			1,3E-02	2,0E-02				
medel			2,7E-03	5,5E-03				
median			1,1E-03	3,5E-03				

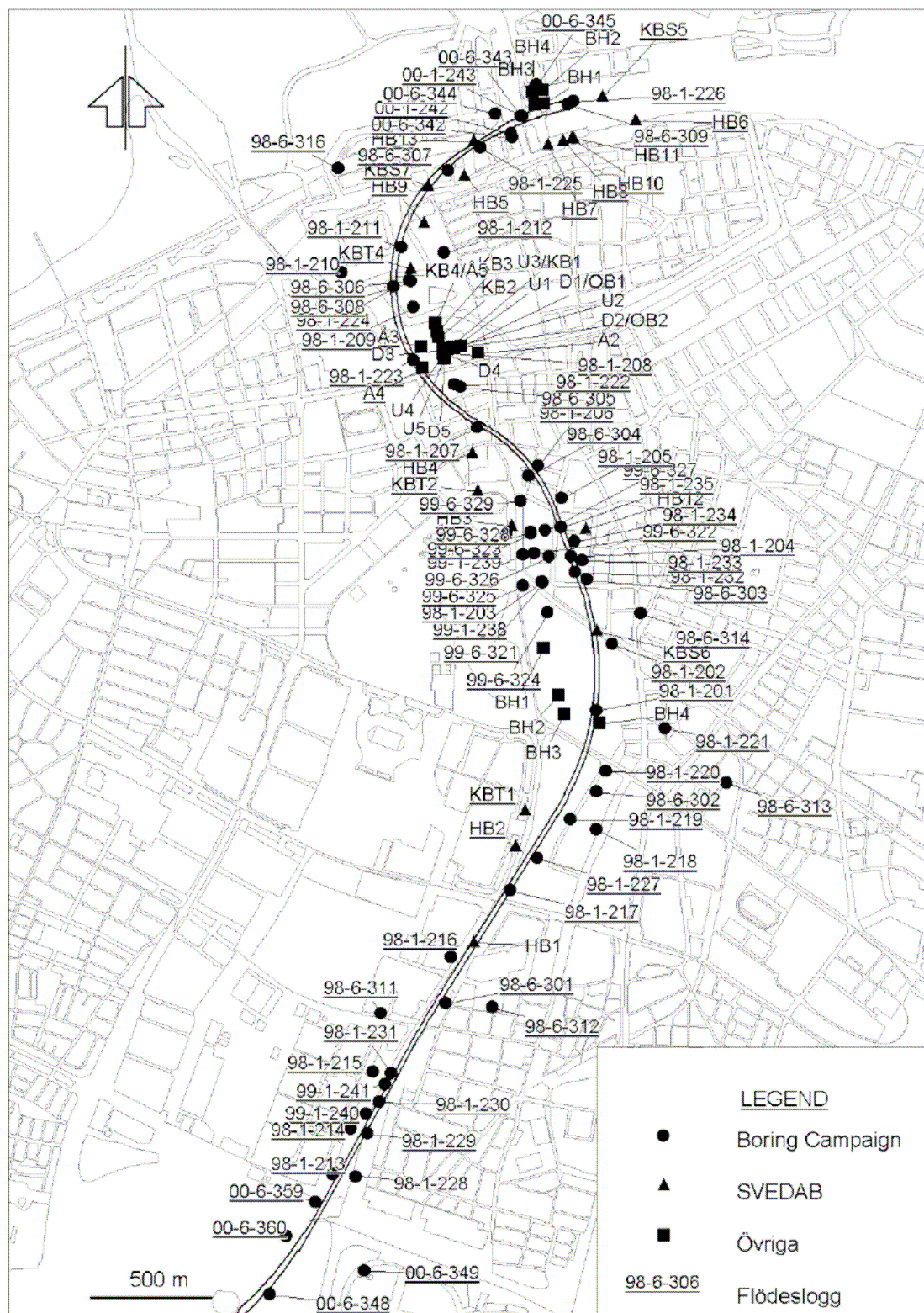
F.U = Filter underkant

F.Ö = Filter överkant

◆ Kapacitetstest 1998-1999



Figur B2-1 Transmissivitet i relation till specifik kapacitet från kapacitetstesterna åren 1998-1999



Figur B2-2 Undersökningspunkternas lägen från Malmö C i norr till Hyllie i söder [13]

Bilaga 3

Kapacitetstester 2001/02

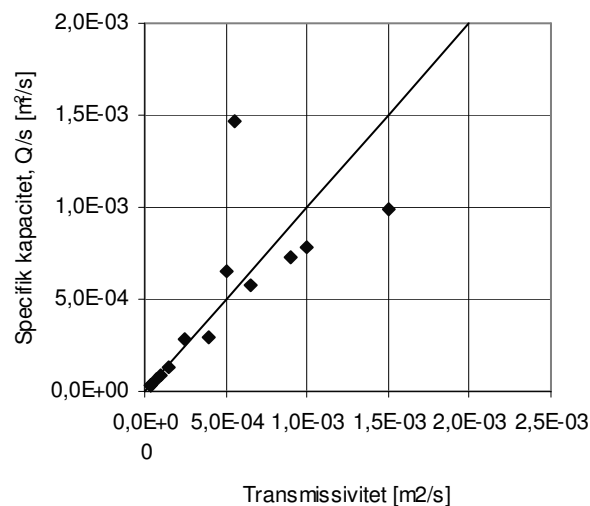
Tabell B3-1 Olika parametrar från 2001-2002 års kapacitetstester

Borrhål	Q [m³/h]	S _{max} [m]	Q/s [m²/s]	T [m²/s]	F.Ö [m]	F.U [m]	L [m]	Längdmätning [m]
01.6.3026	1,08	9,2	3,3E-05	4,0E-05	-15,31	-30,31	15	2533
01.6.3027	1,73	5,4	8,9E-05	1,0E-04	-15,22	-30,22	15	2551
01.6.3028	3,7	7,8	1,3E-04	1,5E-04	-16,65	-30,05	13,4	2572
01.6.3029	1,12	10	3,1E-05	4,0E-05	-14,87	-29,87	15	2607
01.6.3030	1,19	8,8	3,8E-05	4,0E-05	-15,22	-30,27	15,05	2531
01.6.3032	1,13	5	6,3E-05	7,5E-05	-15,11	-30,11	15	2571
01.6.3033	3,06	3	2,8E-04	2,5E-04	-14,88	-29,86	14,98	2603
01.6.3034	7,13	2	9,9E-04	1,5E-03	-1,96	-30,4	28,44	2557
01.6.3035	7,38	2,8	7,3E-04	9,0E-04	-1,49	-29,99	28,5	2576
01.6.3036	4,5	1,6	7,8E-04	1,0E-03	-1,47	-29,87	28,4	2598
01.6.3037	4,14	2	5,8E-04	6,5E-04	0,25	-30,3	30,55	3619
01.6.3048	2,93	2,8	2,9E-04	4,0E-04	-8,03	-30,13	22,1	2543
01.6.3049	9,67	4,1	6,6E-04	5,0E-04	-4,99	-30,04	25,05	2546
01.6.3050	9,54	1,8	1,5E-03	5,5E-04	-2,07	-30,2	28,13	2554
01.6.3051	0	4,6	*	4,5E-04	-1,95	-29,99	28,04	2560
01.6.3052	20,88	0,5	1,2E-02	1,0E-02	1,14	-30,01	31,15	2589
min			3,1E-05	4,0E-05				
max			1,2E-02	1,0E-02				
medel			1,2E-03	1,0E-03				
median			2,9E-04	4,3E-04				

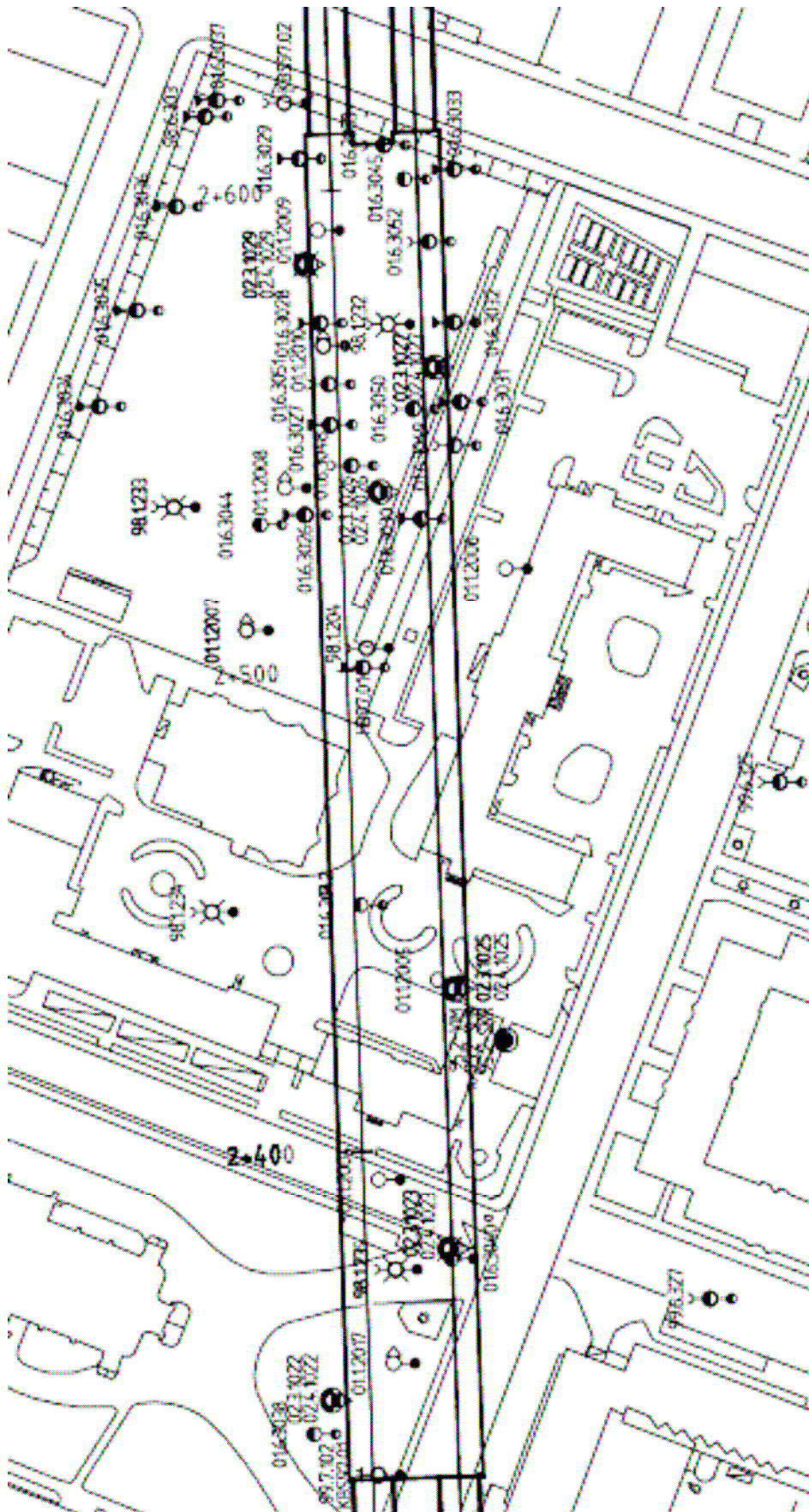
F.U = Filter underkant

F.Ö = Filter överkant

◆ Kapacitetstest 2001-2002



Figur B3-1 Transmissivitet i relation till specifik kapacitet från kapacitetstesterna 2001/02



Bilaga 4 Provpumpning av grundvattensystemets brunnar

Brunn	Transmissivitet [m^2/s]				s_v (m) [m]				Fyllde [m^3/d]				Q_s [m^3/s]				FÖ	F.U	L
	step 1	step 2	step 3	step 4	step 1	step 2	step 3	step 4	step 1	step 2	step 3	step 4	step 1	step 2	step 3	step 4	[m]	[m]	[m]
05.TU 3001	1,1E-03	7,5E-04	1,9E-03	9,4E-04	1,71	3,13	3,96	3,96	33	4,9	6	6	5,4E-04	4,9E-04	4,2E-04	4,2E-04	-24,2	-29,2	5
05.TU 3002	5,3E-04	7,5E-04	6,3E-04	5,2E-04	2,39	5,41	7,66	7,66	28	5,8	8,5	8,5	3,3E-04	3,0E-04	3,1E-04	3,1E-04	-24,1	-29,1	5
05.TU 3003	4,8E-03	3,5E-04	3,6E-04	3,8E-04	1,14	2,73	5,54	5,54	1,6	3	5	5	3,9E-04	3,1E-04	2,5E-04	2,3E-04	-26,5	-31,5	5
05.TU 3004	4,0E-04	2,2E-04	2,2E-04	3,1E-04	4,7	11,4	20,98	20,95	4	8	12	12	2,4E-04	1,9E-04	1,6E-04	1,6E-04	-27,1	-32,1	5
05.TU 3005	2,0E-04	3,0E-04	2,7E-04	3,0E-04	4,52	7,93	12,31	12,31	4,4	8,3	12,3	12,3	2,7E-04	2,9E-04	2,8E-04	2,8E-04	-25,7	-30,7	5
05.TU 3006	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,5E-04	3,47	7,7	13,97	13,97	4	7,9	12,6	12,6	3,2E-04	2,6E-04	2,3E-04	2,3E-04	-26,9	-31,9	5
05.TU 3007	3,2E-04	1,4E-04	1,4E-04	2,2E-04	5,04	13,93	22,97	22,97	3,7	7,8	11,7	11,7	2,0E-04	1,6E-04	1,4E-04	1,4E-04	-26,7	-31,7	5
05.TU 3008	1,6E-04	1,4E-04	5,6E-04	1,7E-04	6,69	16,84	17,34	17,34	3,2	7,1	7,1	7,1	1,3E-04	1,2E-04	1,1E-04	1,1E-04	-26,1	-31,1	5
05.TU 3009	1,7E-04	6,0E-05	8,1E-05	2,0E-04	2,72	7,75	14,65	14,65	1,3	2,8	5,1	5,1	1,3E-04	1,0E-04	9,7E-05	9,7E-05	-27	-32	5
05.TU 3010	5,6E-04	1,2E-04	1,1E-04	2,4E-04	3,26	7,26	12,73	12,23	2,2	4,1	5,8	5,8	1,9E-04	1,6E-04	1,3E-04	1,3E-04	-27	-32	5
05.TU 3011	3,4E-04	2,2E-04	2,3E-04	4,1E-04	2,27	7,93	16,54	16,54	1,5	4,1	7,2	7,2	1,8E-04	1,4E-04	1,2E-04	1,2E-04	-27	-32	5
05.TU 3012	4,8E-04	1,2E-04	1,6E-04	1,3E-04	1,65	5,91	11,85	11,85	1,5	4,1	7,2	7,2	2,3E-04	1,9E-04	1,7E-04	1,7E-04	-28,5	-33,5	5
05.TU 3013	1,3E-04	2,4E-04	3,0E-04	6,4E-04	3,08	6,21	12,52	12,52	2,6	3,9	7,1	7,1	2,3E-04	1,7E-04	1,6E-04	1,6E-04	-28,6	-33,6	5
05.TU 3014	2,1E-04	2,4E-04	2,5E-04	1,3E-03	4,26	6,8	20,14	20,14	3,4	4,8	9,4	9,4	2,2E-04	2,0E-04	1,3E-04	1,3E-04	-27,6	-32,6	5
05.TU 3015	2,3E-04	2,5E-04	9,0E-04	6,0E-04	4,26	13,52	22,72	22,72	2,4	4,9	7	7	1,6E-04	1,0E-04	8,6E-05	8,6E-05	-27,6	-32,6	5
05.TU 3016	1,6E-03	6,0E-04	6,4E-04	1,2E-03	2,74	7,54	15	15	3,1	6,2	9,52	9,52	3,1E-04	2,3E-04	1,8E-04	1,7E-04	-27,7	-32,7	5
05.TU 3017	1,3E-03	6,0E-04	6,4E-04	2,3E-03	1,68	3,43	5,33	5,33	4,7	8,6	12,2	12,2	7,8E-04	7,0E-04	6,4E-04	6,4E-04	-27,9	-32,9	5
05.TU 3018	-8,1E-03	9,3E-04	6,0E-04	9,3E-04	0,46	1,39	3,15	3,15	2,1	4,6	7,7	7,7	1,2E-05	9,2E-04	6,8E-04	6,8E-04	-27,8	-32,8	5
05.TU 3019	-7,8E-03	7,6E-04	6,5E-04	1,7E-03	1,88	4,95	8,71	8,71	2,6	6,2	9	9	4,3E-04	3,5E-04	2,9E-04	2,9E-04	-27	-32	5
05.TU 3020	3,5E-04	2,3E-04	1,0E-04	8,7E-04	5,16	10,95	16,68	16,68	3	5,9	8,2	8,2	1,6E-04	1,5E-04	1,4E-04	1,4E-04	-27	-32	5
05.TU 3021	3,2E-04	2,7E-03	8,9E-05	1,4E-03	3,51	6,34	6,31	6,31	3	4,6	4,8	4,8	2,4E-04	2,0E-04	2,1E-04	2,1E-04	-27,9	-32,9	5
05.TU 3022	5,6E-04	1,8E-04	1,5E-04	5,4E-04	3,05	8,2	14,53	14,53	2,8	5,8	8,5	8,5	2,6E-04	2,0E-04	1,6E-04	1,6E-04	-27,8	-32,8	5
05.TU 3023	3,0E-04	3,0E-04	2,4E-04	2,8E-04	2,63	4,99	7,57	7,57	2,3	4	5,2	5,2	2,4E-04	2,2E-04	1,9E-04	1,9E-04	-27,1	-32,1	5
05.TU 3024	2,3E-04	1,6E-04	1,9E-04	1,3E-04	7,75	11,99	18,83	18,83	6	8,3	13,1	13,1	2,2E-04	1,9E-04	1,9E-04	1,9E-04	-27,4	-32,4	5
05.TU 3025	2,0E-04	1,1E-04	3,8E-04	1,3E-04	6,32	12,63	21,28	21,28	4,3	6,8	11	11	1,9E-04	1,5E-04	1,4E-04	1,4E-04	-27,4	-32,4	5
05.TU 3026	2,1E-04	1,3E-04	1,4E-04	3,3E-04	4,64	11,32	25,19	25,19	3,8	7,7	12,4	12,4	2,3E-04	1,9E-04	1,4E-04	1,4E-04	-27,1	-32,1	5
05.TU 3027	2,7E-04	2,1E-04	2,1E-04	2,8E-04	3,52	8,8	15,55	15,55	4,4	8	12,1	12,1	3,1E-04	2,5E-04	2,2E-04	2,2E-04	-27	-32	5
05.TU 3028	2,7E-04	1,2E-04	1,7E-04	2,3E-04	4,38	13,59	22,04	22,04	4,1	8,6	10,7	10,7	2,3E-04	1,8E-04	1,3E-04	1,3E-04	-27,3	-32,3	5
05.TU 3033	1,5E-04	3,8E-04	1,5E-03	4,6E-04	7,93	14,33	16,38	16,38	4,7	7,3	11,8	11,8	1,6E-04	1,4E-04	2,0E-04	2,0E-04	-24,8	-29,8	5
05.TU 3034	8,3E-05	7,6E-05	9,0E-05	9,4E-05	5,02	9,51	14,68	14,68	1,6	2,8	4,2	4,2	8,9E-05	8,2E-05	7,9E-05	7,9E-05	-26,5	-31,5	5
medel	-2,6E-06	3,9E-04	3,9E-04	5,9E-04															
median	2,9E-04	2,4E-04	2,5E-04	3,7E-04															
min	-8,1E-03	6,0E-05	8,1E-05	9,4E-05															
max	4,8E-03	2,7E-03	1,5E-03	2,3E-03															

F Ö = Filteröverkora
F U = Filterunderskora

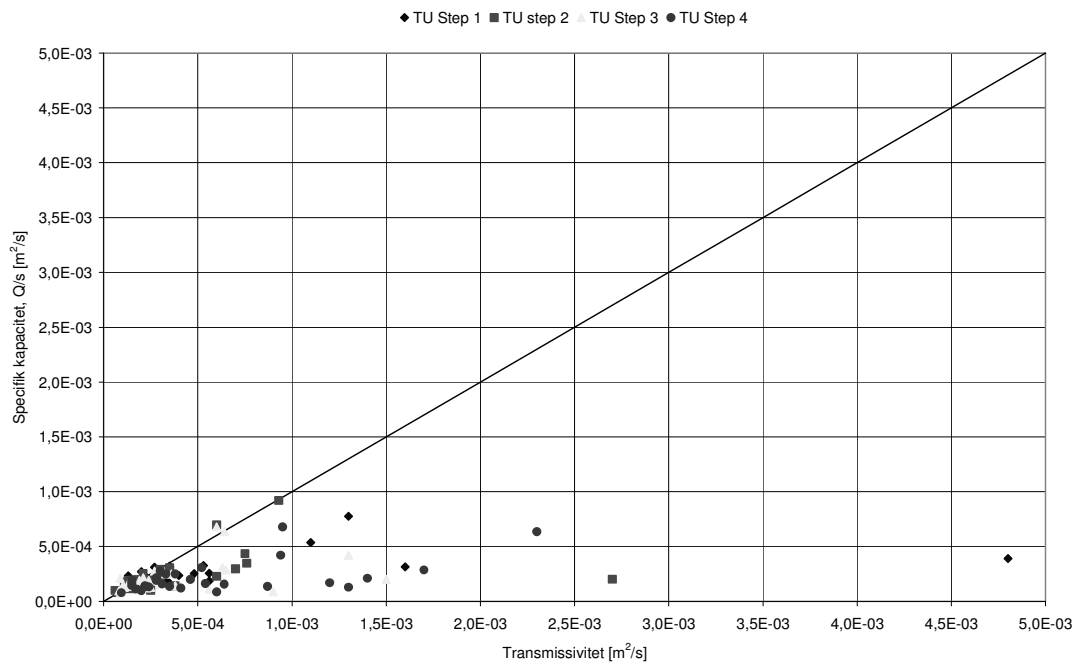
Tabell B4-1 Olika parametrar från provpumpning av grundvattensystemets uttagsbrunnar år 2005

Brunn	Transmissivitet [m^2/s]				$s_w(\text{meas})$ [m]				FÖde [m^3/h]				Q _{te} [m^3/s]				F.Ö [m]	F.U [m]	L [m]
	step 1	step 2	step 3	step 4	step 1	step 2	step 3	step 4	step 1	step 2	step 3	step 4	step 1	step 2	step 3	step 4			
05.TU 3001	1,1E-03	7,5E-04	1,3E-03	9,4E-04	1,71	3,13	3,96	3,96	3,3	4,9	6	6	5,4E-04	4,3E-04	4,2E-04	4,2E-04	-24,2	-29,2	5
05.TU 3002	5,3E-04	7,0E-04	6,3E-04	5,2E-04	2,39	5,41	7,66	7,66	28	58	8,5	8,5	3,3E-04	3,0E-04	3,1E-04	3,1E-04	-24,1	-29,1	5
05.TU 3003	4,8E-03	3,5E-04	3,6E-04	3,8E-04	1,14	2,73	5,54	5,54	1,6	3	5	5	3,9E-04	3,1E-04	2,5E-04	2,5E-04	-26,5	-31,5	5
05.TU 3004	4,0E-04	2,2E-04	2,2E-04	3,1E-04	4,7	11,4	20,98	20,95	4	8	12	12	2,4E-04	1,9E-04	1,6E-04	1,6E-04	-27,1	-32,1	5
05.TU 3005	2,0E-04	3,0E-04	2,7E-04	3,0E-04	4,52	7,93	12,31	12,31	4,4	8,3	12,3	12,3	2,7E-04	2,9E-04	2,8E-04	2,8E-04	-25,7	-30,7	5
05.TU 3006	3,5E-04	3,5E-04	3,3E-04	3,3E-04	3,47	7,7	13,97	13,97	4	7,9	12,6	12,6	3,2E-04	2,8E-04	2,5E-04	2,5E-04	-26,9	-31,9	5
05.TU 3007	3,2E-04	1,3E-04	1,4E-04	2,2E-04	5,04	13,83	22,97	22,97	3,7	7,8	11,7	11,7	2,0E-04	1,6E-04	1,4E-04	1,4E-04	-26,7	-31,7	5
05.TU 3008	1,6E-04	1,4E-04	5,6E-04	1,7E-04	6,69	16,84	17,34	17,34	3,2	7,1	7,1	7,1	1,3E-04	1,2E-04	1,1E-04	1,1E-04	-26,1	-31,1	5
05.TU 3009	1,7E-04	6,0E-05	8,1E-05	2,0E-04	2,72	7,75	14,65	14,65	1,3	2,8	5,1	5,1	1,3E-04	1,0E-04	9,7E-05	9,7E-05	-27	-32	5
05.TU 3010	5,6E-04	1,2E-04	1,1E-04	2,4E-04	3,26	7,26	12,73	12,23	2,2	4,1	5,8	5,8	1,9E-04	1,6E-04	1,3E-04	1,3E-04	-27	-32	5
05.TU 3011	3,4E-04	2,2E-04	2,3E-04	4,1E-04	2,27	7,93	16,54	16,54	1,5	4,1	7,2	7,2	1,8E-04	1,4E-04	1,2E-04	1,2E-04	-27	-32	5
05.TU 3012	4,8E-04	1,5E-04	1,6E-04	1,5E-04	1,65	5,91	11,85	11,85	1,5	4,1	7,2	7,2	2,5E-04	1,9E-04	1,7E-04	1,7E-04	-26,5	-33,5	5
05.TU 3013	1,3E-04	2,4E-04	3,0E-04	6,4E-04	3,06	6,21	12,52	12,52	2,6	3,9	7,1	7,1	2,3E-04	1,7E-04	1,6E-04	1,6E-04	-26,6	-33,6	5
05.TU 3014	2,1E-04	2,4E-04	2,5E-04	1,3E-03	4,26	6,8	20,14	20,14	3,4	4,8	9,4	9,4	2,2E-04	2,0E-04	1,3E-04	1,3E-04	-27,6	-32,6	5
05.TU 3015	2,3E-04	2,5E-04	9,0E-04	6,0E-04	4,26	13,52	22,72	22,72	2,4	4,9	7	7	1,6E-04	1,0E-04	8,6E-05	8,6E-05	-27,6	-32,6	5
05.TU 3016	1,6E-03	6,0E-04	6,4E-04	1,2E-03	2,74	7,54	15	15	3,1	6,2	9,52	9,2	3,1E-04	2,3E-04	1,8E-04	1,7E-04	-27,7	-32,7	5
05.TU 3017	1,3E-03	6,0E-04	6,4E-04	2,3E-03	1,68	3,43	5,33	5,33	4,7	8,6	12,2	12,2	7,8E-04	7,0E-04	6,4E-04	6,4E-04	-27,9	-32,9	5
05.TU 3018	-8,1E-03	9,3E-04	6,0E-04	9,5E-04	0,48	1,39	3,15	3,15	2,1	4,6	7,7	7,7	1,2E-03	9,2E-04	6,8E-04	6,8E-04	-27,8	-32,8	5
05.TU 3019	-7,8E-03	7,6E-04	6,5E-04	1,7E-03	1,68	4,95	8,71	8,71	2,6	6,2	9	9	4,3E-04	3,5E-04	2,9E-04	2,9E-04	-27	-32	5
05.TU 3020	3,5E-04	2,3E-04	1,0E-04	8,7E-04	5,16	10,95	16,68	16,68	3	5,9	8,2	8,2	1,6E-04	1,5E-04	1,4E-04	1,4E-04	-27	-32	5
05.TU 3021	3,2E-04	2,7E-03	8,9E-05	1,4E-03	3,51	6,34	6,31	6,31	3	4,6	4,8	4,8	2,4E-04	2,0E-04	2,1E-04	2,1E-04	-27,9	-32,9	5
05.TU 3022	5,6E-04	1,8E-04	1,3E-04	5,4E-04	3,05	8,2	14,53	14,53	2,8	5,8	8,5	8,5	2,6E-04	2,0E-04	1,6E-04	1,6E-04	-27,8	-32,8	5
05.TU 3023	3,0E-04	3,0E-04	2,4E-04	2,8E-04	2,63	4,99	7,57	7,57	2,3	4	5,2	5,2	2,4E-04	2,2E-04	1,9E-04	1,9E-04	-27,1	-32,1	5
05.TU 3024	2,3E-04	1,6E-04	1,9E-04	1,5E-04	7,75	11,99	18,83	18,83	6	8,3	13,1	13,1	2,2E-04	1,9E-04	1,9E-04	1,9E-04	-27,4	-32,4	5
05.TU 3025	2,0E-04	1,1E-04	3,8E-04	1,5E-04	6,32	12,63	21,28	21,28	4,3	6,8	11	11	1,9E-04	1,5E-04	1,4E-04	1,4E-04	-27,4	-32,4	5
05.TU 3026	2,1E-04	1,3E-04	1,4E-04	3,5E-04	4,64	11,32	25,19	25,19	3,8	7,7	12,4	12,4	2,3E-04	1,9E-04	1,4E-04	1,4E-04	-27,1	-32,1	5
05.TU 3027	2,7E-04	2,1E-04	2,1E-04	2,8E-04	3,92	8,8	15,55	15,55	4,4	8	12,1	12,1	3,1E-04	2,5E-04	2,2E-04	2,2E-04	-27	-32	5
05.TU 3028	2,7E-04	1,2E-04	1,7E-04	2,3E-04	4,58	13,59	22,04	22,04	4,1	8,6	10,7	10,7	2,5E-04	1,8E-04	1,3E-04	1,3E-04	-27,3	-32,3	5
05.TU 3033	1,5E-04	3,8E-04	1,5E-03	4,6E-04	7,93	14,33	16,38	16,38	4,7	7,3	11,8	11,8	1,6E-04	1,4E-04	2,0E-04	2,0E-04	-24,8	-29,8	5
05.TU 3034	8,3E-05	7,6E-05	9,0E-05	9,4E-05	5,02	9,51	14,68	14,68	1,6	2,8	4,2	4,2	8,9E-05	8,2E-05	7,9E-05	7,9E-05	-26,5	-31,5	5
medel	-2,6E-06	3,9E-04	3,9E-04	5,9E-04															
median	2,9E-04	2,4E-04	2,5E-04	3,7E-04															
min	-8,1E-03	6,0E-05	8,1E-05	9,4E-05															
max	4,8E-03	2,7E-03	1,5E-03	2,3E-03															

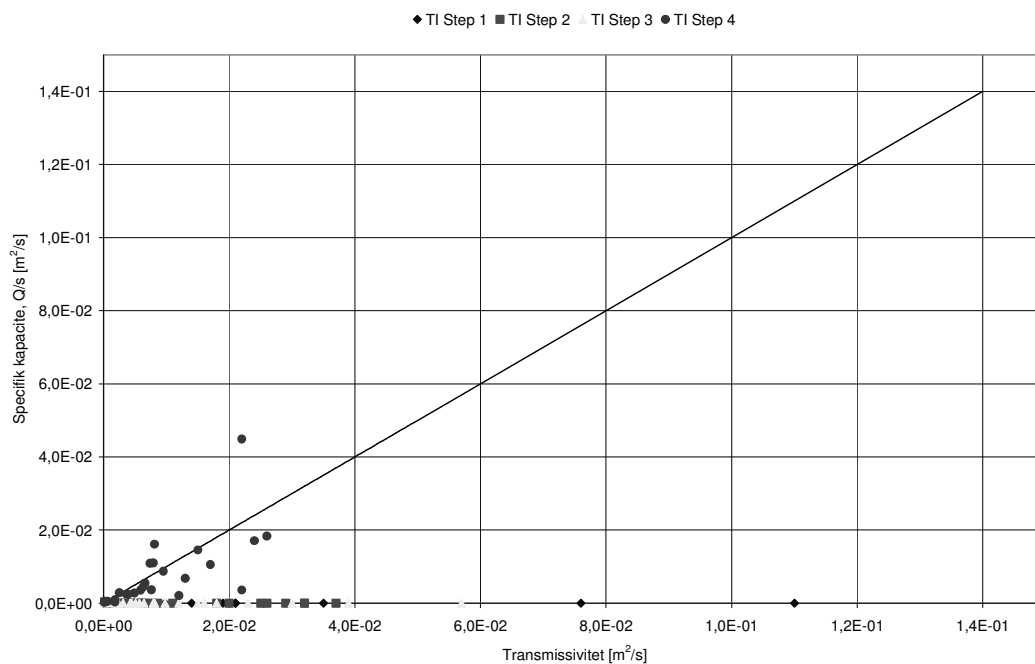
F.Ö= Filteröverkant
F.U= Filterunderkant

Tabell

B4-2 Olika parametrar från provpumpning av grundvattensystemets infiltrationsbrunnar år 2005

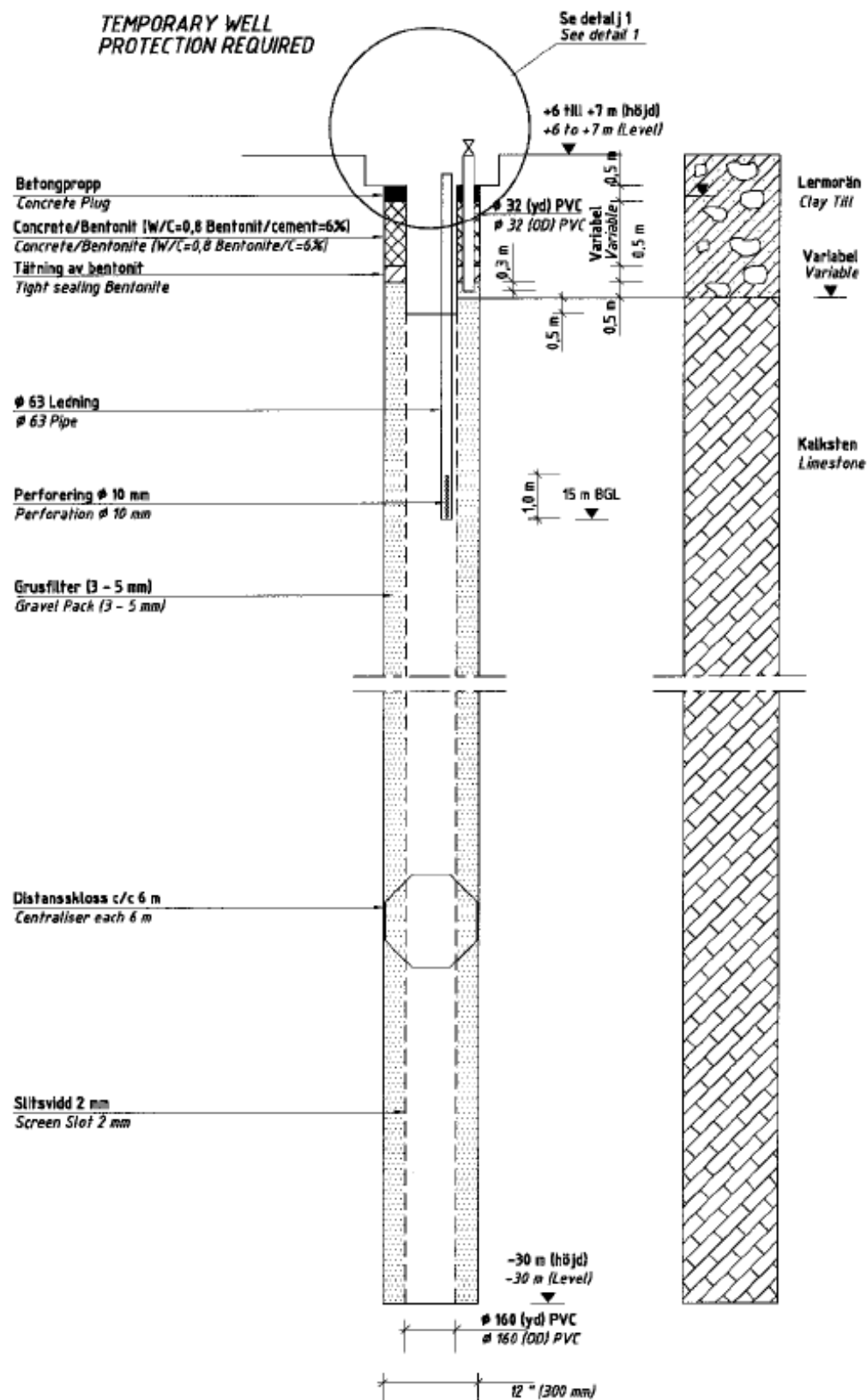


Figur B4-3 Transmissivitet i relation till specifik kapacitet från provpumpning av grundvattenssystemets uttagsbrunnar år 2005. Provpumpningen gjordes i fyra steg varav step 1-3 är avsänkning och step 4 är återhämtning.

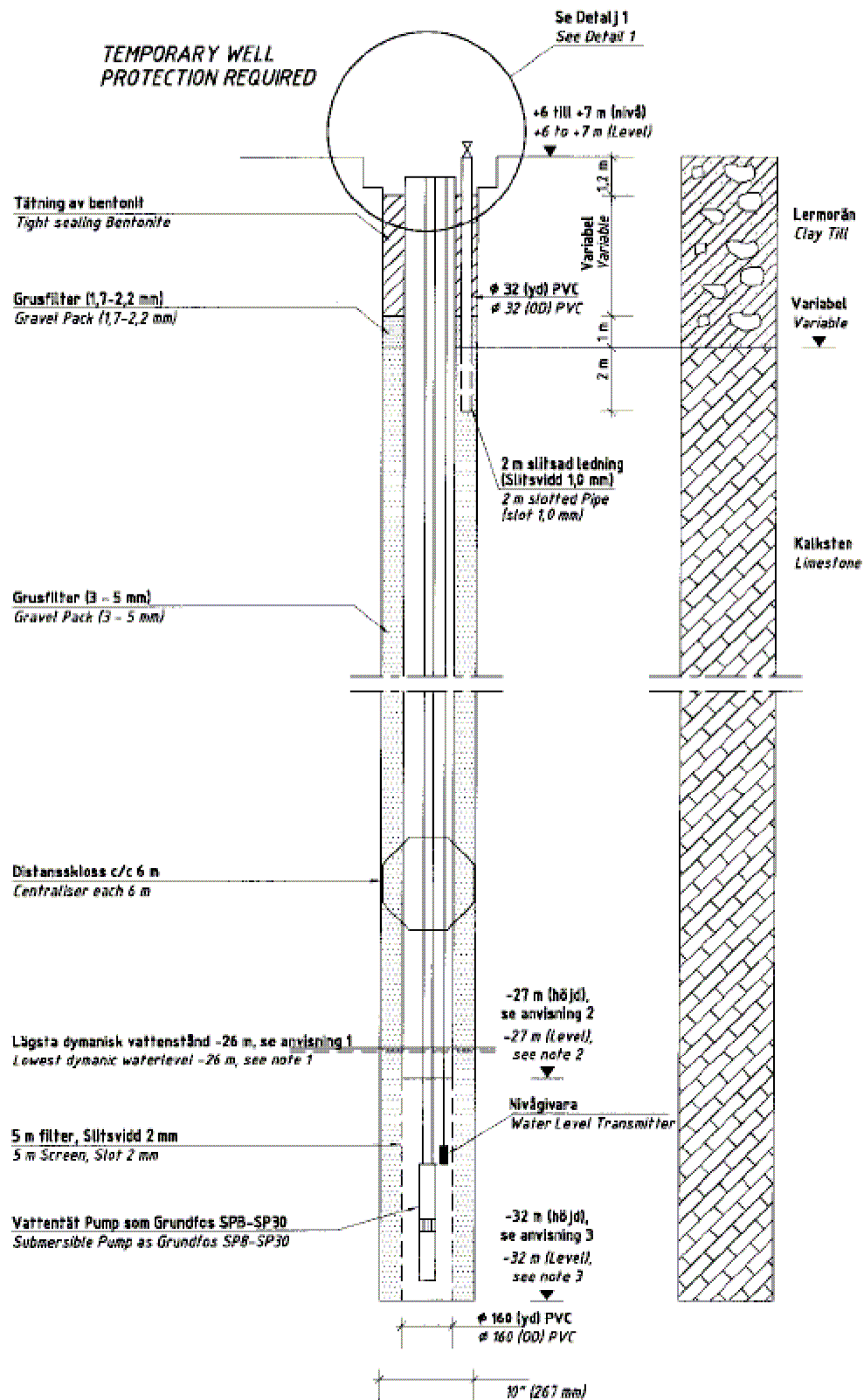


Figur B4-4 Transmissivitet i relation till specifik kapacitet från provpumpning av grundvattenssystemets infiltrationsbrunnar år 2005. Provpumpningen gjordes i fyra steg varav step 1-3 är avsänkning och step 4 är återhämtning.

Bilaga 5 Brunnnsutförande

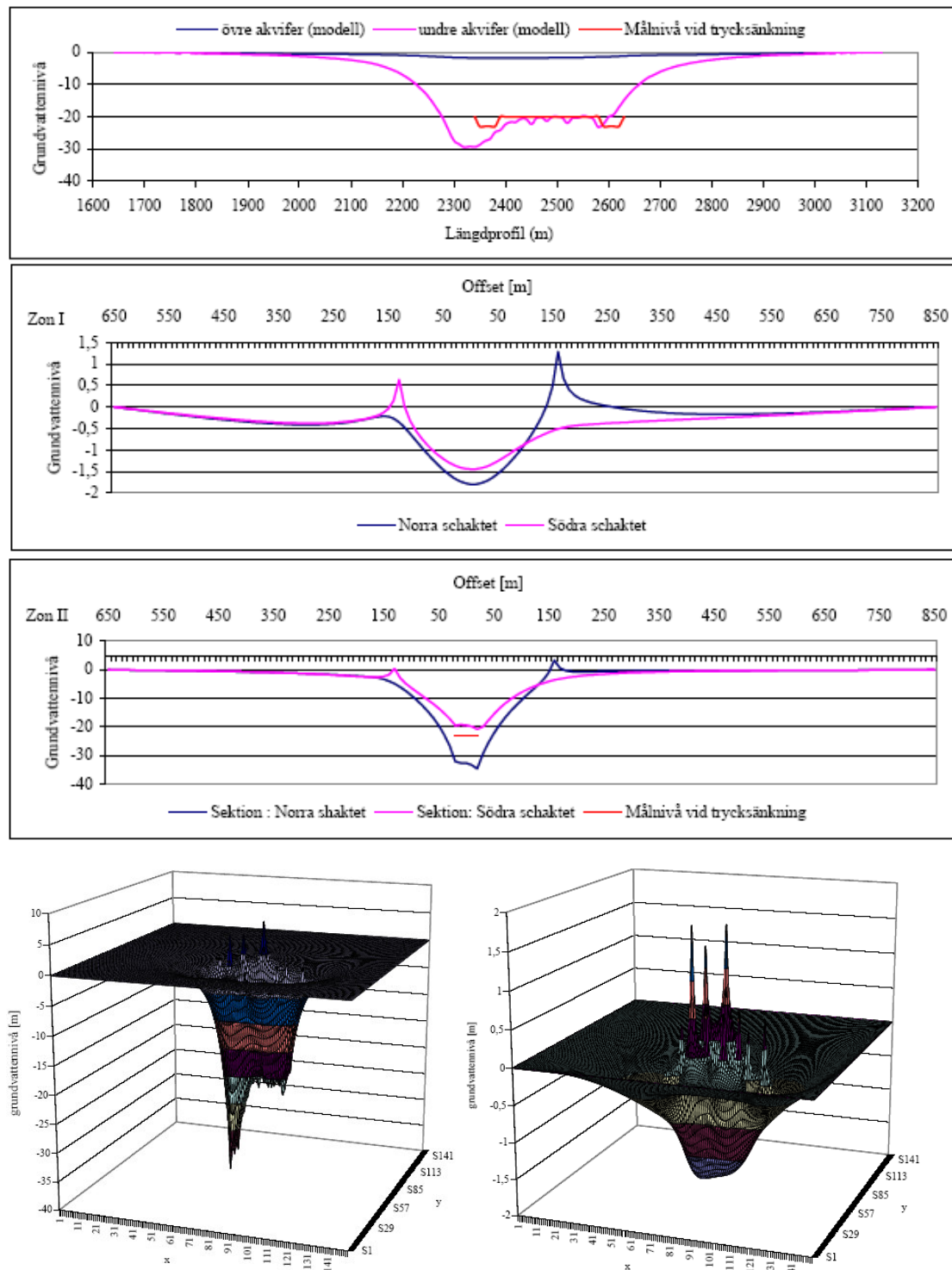


Figur B5-1 Temporär återinfiltrationsbrunn

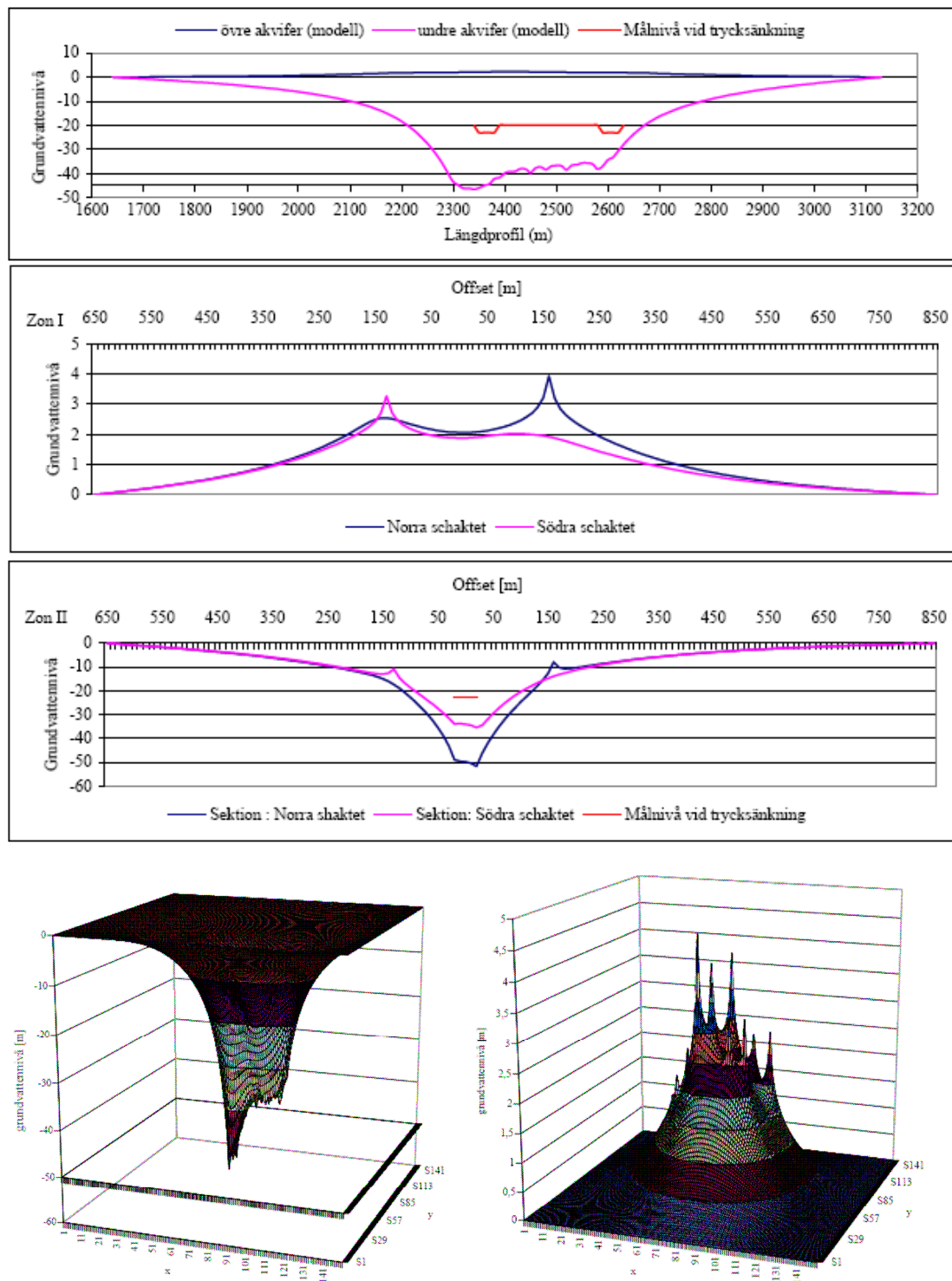


Figur B5 Temporär uttagsbrunn

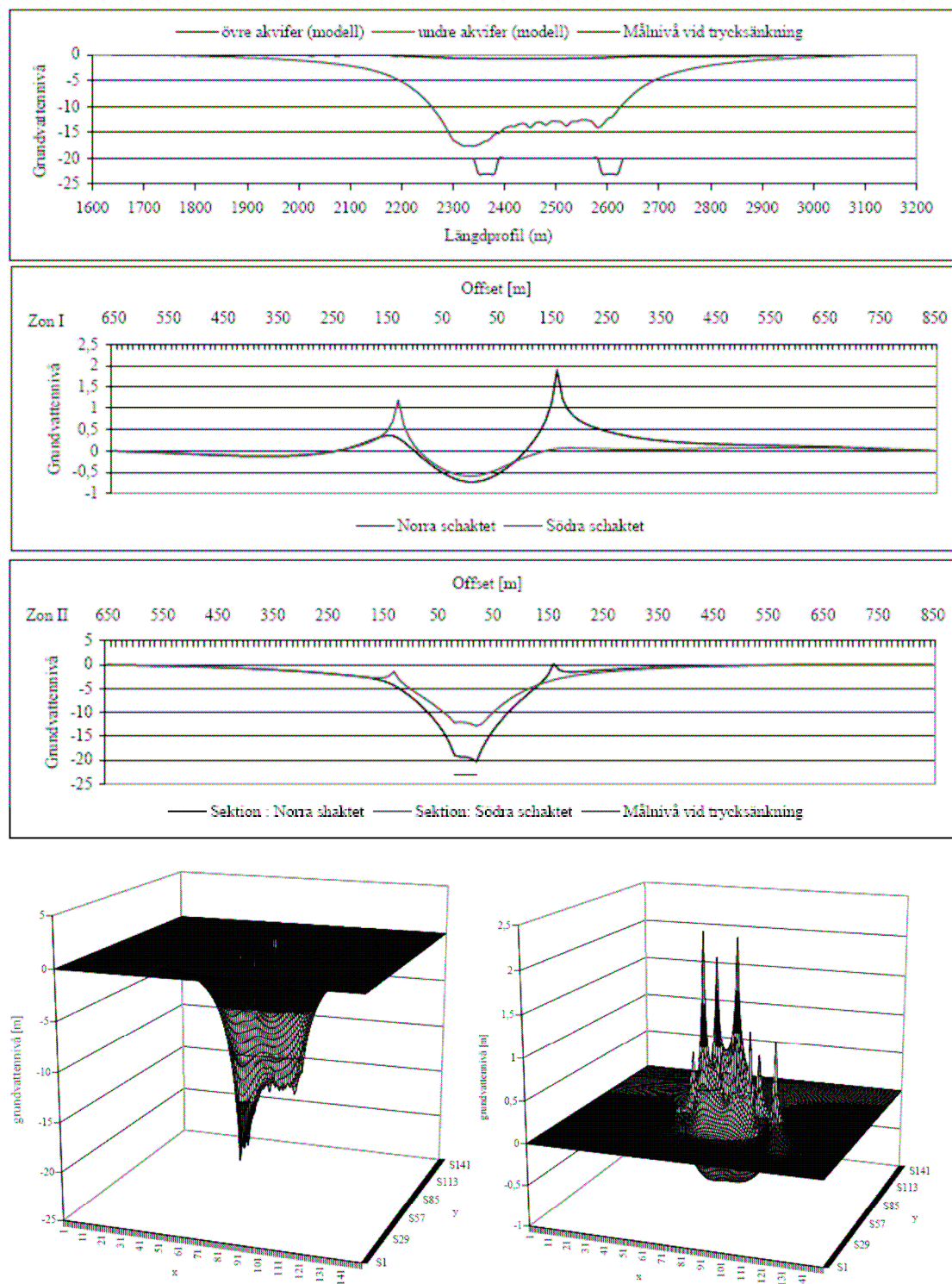
Bilaga 6 Resultat från Excellbaserad modell



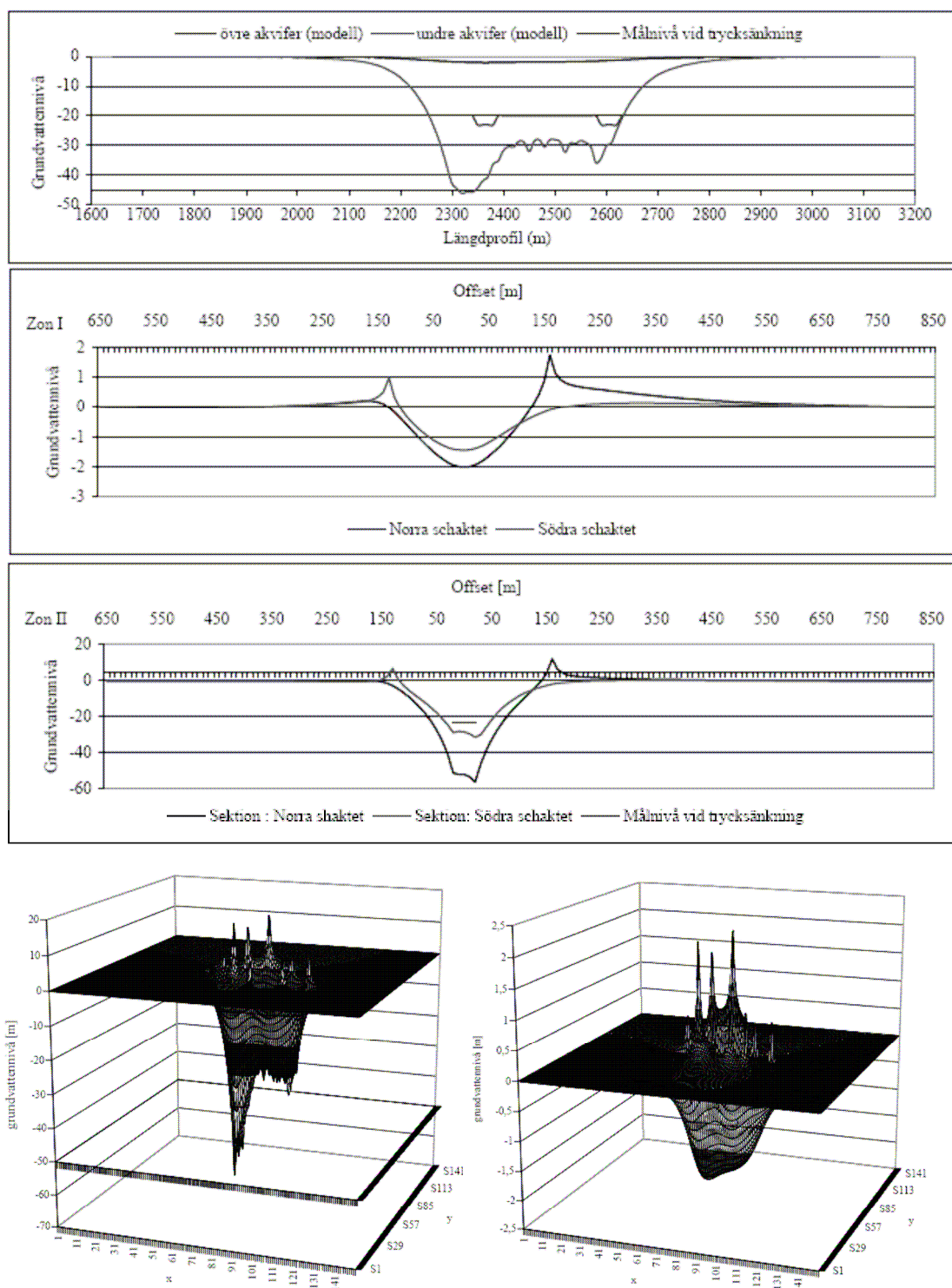
Figur B6-1 Referenssimulering med $T_{zonI} = 8,7 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$, $T_{zonII} = 1,8 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$
 $K'/b = 5,5 \cdot 10^{-9} [1/s]$



Figur B6-2 Simulering 1 med $T_{zonI} = 8,7 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$, $T_{zonII} = 1,8 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$
 $K'/b = 5,5 \cdot 10^{-9} [1/s]$

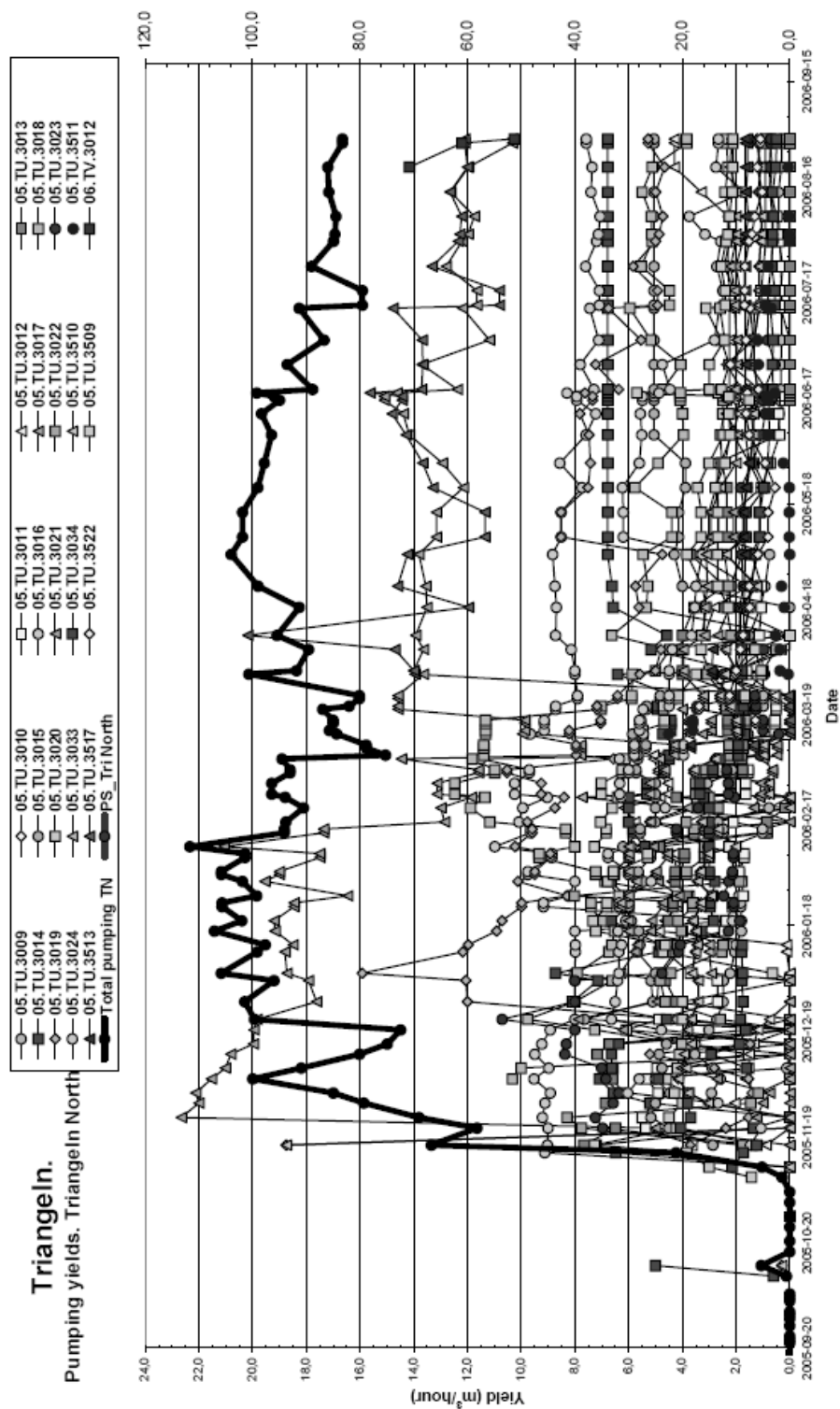


Figur B6-3 Simulering 2 med $T_{zonI} = 8,7 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$, $T_{zonII} = 3,6 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$
 $K'/b = 5,5 \cdot 10^{-8} [1/s]$

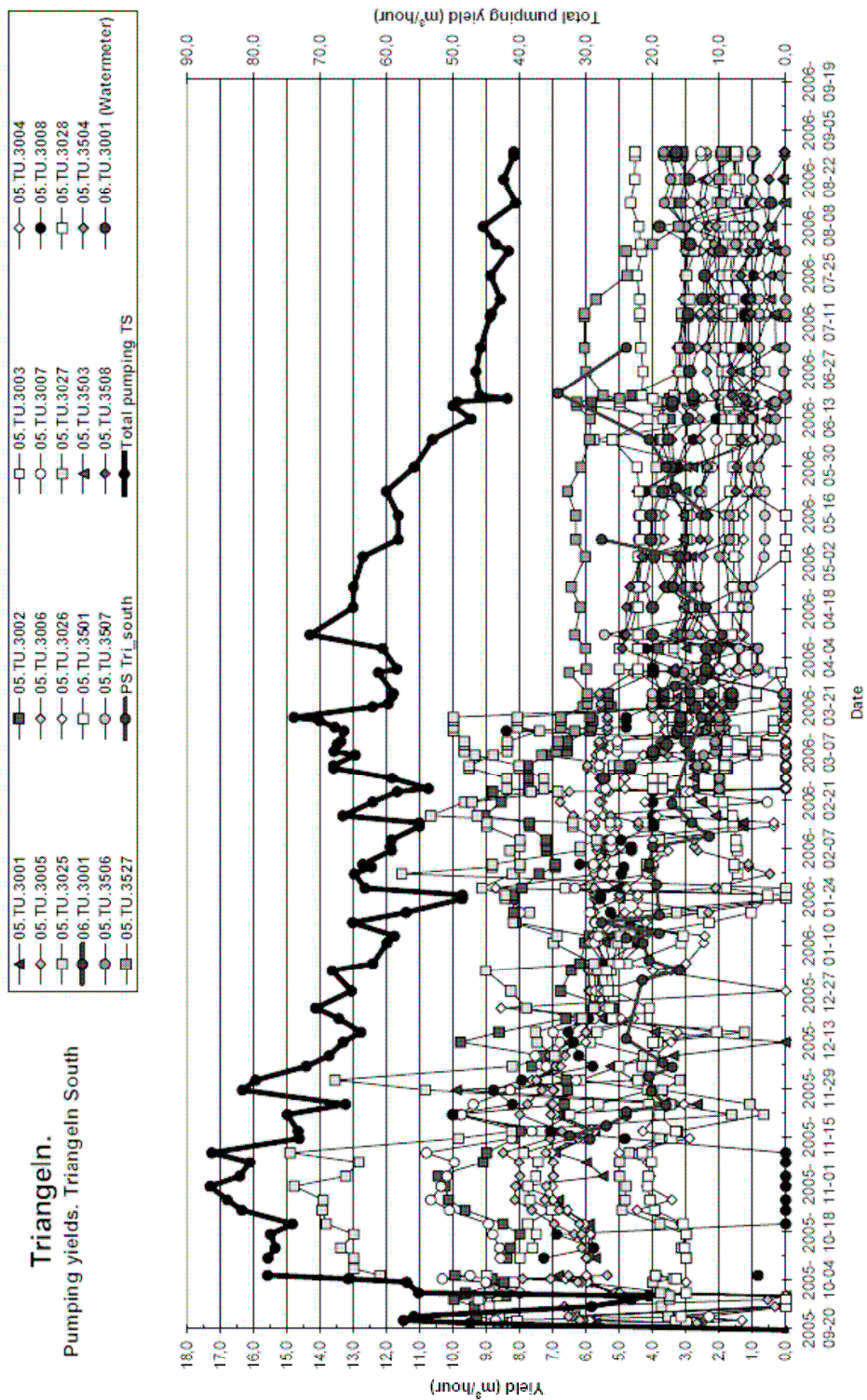


Figur B6-4 Simulering 3 med $T_{zonI} = 8,7 \cdot 10^{-4} [m^2/s]$, $T_{zonII} = 9,0 \cdot 10^{-5} [m^2/s]$
 $K/b = 1,0 \cdot 10^{-8} [1/s]$

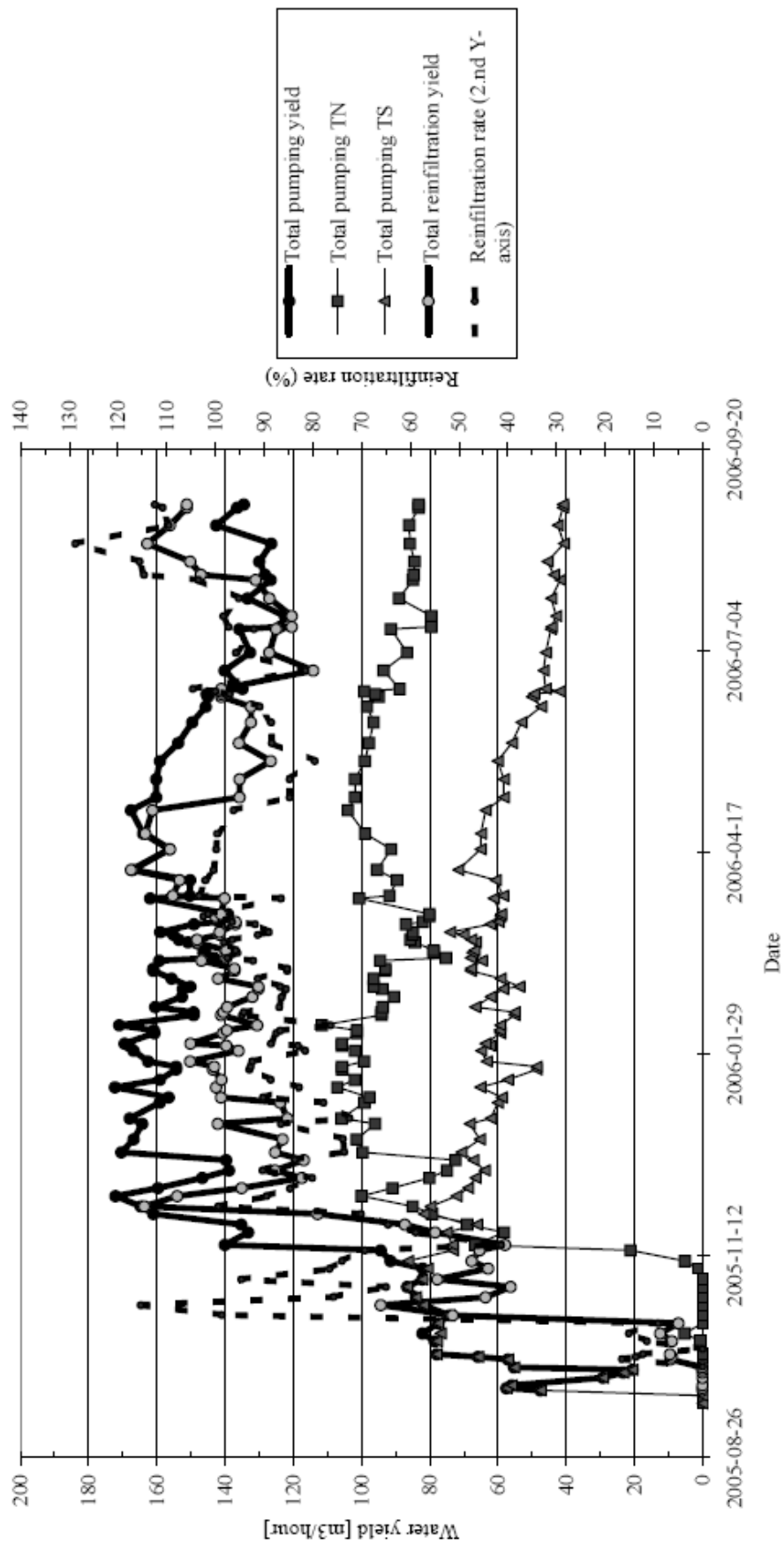
Bilaga 7 Grundvattenflöden vid Triangeln



Figur B7-1 Grundvattenflödet vid den norra delen av Triangeln



Figur B7-2 Grundvattenflödet i den södra delen av Triangeln



Figur B7-3 Det totala grundvattenflödet vid station Triangeln