



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W-14012

Examensarbete 30 hp
Maj 2014

Norrvattens reservvattentäkt i Märsta

- grundvattenmodellering av försök med konstgjord
grundvattenbildning

Frida Hammar

REFERAT

Norrvattens reservvattentäkt i Märsta - grundvattenmodellering av försök med konstgjord grundvattenbildning

Frida Hammar

Norrvatten är ett kommunalförbund som förser Stockholms norra kommuner med dricksvatten. Norrvatten har fyra grundvattentäkter som skulle kunna fungera som reserver vid ett eventuellt ledningsbrott eller förorening av den ordinarie ytvattentäkten, Mälaren. Målet är att uttaget från Mälaren vid behov ska kunna ersättas i upp till en månad. De befintliga grundvattentäkterna har i dagsläget inte den vattentillgång som behövs för detta. Grundvattengruppen har på uppdrag av Norrvatten gjort en genomgång av tidigare undersökningsmaterial, driftdata och kompletterande fältbedömningar som visade att konstgjord grundvattenbildning i form av infiltration skulle kunna vara en lämplig lösning på problemet med grundvattentäkternas begränsade vattentillgång. Utifrån denna information har Norrvatten även valt ut Märsta grundvattentäkt, strax söder om Arlanda, som den första reservgrundvattentäkten att utföra infiltrationsförsök på. I denna studie simuleras olika uttags- och infiltrationsscenarioer för att fungera som en prognos för framtida provpumpningar och infiltrationsförsök i fält.

För att se hur grundvattenmagasinet svarar på olika uttags- och infiltrationsscenarioer genomfördes en grundvattenmodellering. I en konceptuell modell beskrevs grundvattenmagasinets gränser, grundvattenbildning, jord- och berglagerföljder, materialegenskaper och grundvattenströmning. Med den konceptuella modellen som grund konstruerades en matematisk modell som sedan användes för simuleringar av scenarier i programmet Feflow 6.1. Modellen byggdes upp av en generisk lagerföljd som princip, med som mest sex olika jordlagerföljder där ett berglager med låg vattengenomsläpplighet utgjorde det understa lagret. Modellen tilldelades randvillkor där no flow antogs i samtliga av modellen yttre gränser medan den delen av modellen som representerar sjön Fysingens botten tilldelades ett villkor som relaterar flödet över randen till vattenståndet i sjön.

Efter modellens uppbyggnad kalibrerades den med hjälp av tidigare uppmätta grundvattennivåer i området. Kalibreringen utfördes först för stationära, ostörda förhållanden och sedan för transienta förhållanden där tidigare pumptest användes som grund. Med den färdigkalibrerade modellen simulerades sedan tre scenarier på (i) 100 L/s uttag utan infiltration, (ii) infiltration och uttag med 150 L/s samt (iii) infiltration och uttag med 300 L/s. Samtliga scenarier simulerades under en månads tid.

Resultatet av de simulerade infiltrations- och uttagsförsöken visar att det skulle vara möjligt att göra ett uttag av 150 L/s eller 300 L/s under en månads tid så länge som det sker en konstgjord grundvattenbildning genom infiltration av samma mängd. Att ta ut mängder i storleksordningen av 100 L/s utan infiltration kommer troligtvis påverka grundvattnets kvalitet negativt med avseende på hårdhet och kloridhalt.

Nyckelord: *Feflow 6.1, konstgjord grundvattenbildning, infiltration, grundvattenmodellering.*

*Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära. Uppsala universitet
Villavägen 16, SE -752 36, UPPSALA, ISSN 1401-5765.*

ABSTRACT

Norrvatten's reserve water supply in Märsta – Groundwater Modelling of Scenarios with Artificial Recharge

Frida Hammar

Norrvatten is a municipal council which produces and distributes water to the northeastern part of Stockholm. Norrvatten has four groundwater treatment plants that could work as backups in case one of their pipelines break or their current surface water resource, Mälaren, gets contaminated. Norrvatten has set a goal to be able to replace Mälaren for up to one month if needed. However, neither of their four backup groundwater resources, in the current state, would be able to meet that demand. Field studies and analysis of data from existing drilling wells showed that using infiltration as artificial groundwater recharge would be a suitable solution of the limited water supply. The groundwater supply in Märsta which is one of Norrvatten's reserve water supplies was considered to be a good location to start the infiltration tests at. The purpose of this study is to serve as a forecast for future field studies of pumping and infiltrations tests.

Groundwater modelling was used to see how the groundwater supply responds to potential infiltration and extractions by simulating different withdrawals and infiltration scenarios. The groundwater divide, groundwater recharge, soil and rock strata, material properties and groundwater flow were described in a conceptual model. A mathematical model was then created based on the conceptual model. The program used for simulating the different scenarios was Feflow 6.1. A generic soil strata with 6 layers was assigned to the model with a rock layer with low water permeability as the bottom layer. Height data was obtained from *The Swedish mapping, cadastral and land registration authority* (Lantmäteriet) and used to create the surface of the ground. The surface of the rock layer was created from information about elevations of the rock above surface level and information from drilling wells of depth to rock surface. The boundary conditions assigned to the model were no flow across the whole outer boundary and a head-dependent flow boundary condition along the bottom of lake Fysingen.

The model was calibrated with some measured ground water levels in the area. At first the calibration was performed assuming steady state and then for transient conditions with data from previous pumping tests. Three different scenarios were simulated in the model, chosen with the purpose to give a significant contribution to the total amount of water that Norrvatten requires during one month. The scenarios were; a withdrawal of 100L/s without infiltration, withdrawal and infiltration of 150L/s and withdrawal and infiltration of 300L/s.

The simulated result showed that a withdrawal of 100 L/s during one month without infiltration would probably have a negative impact on the quality of the groundwater when it comes to chloride and hardness of the water. However, withdrawal with 150 L/s or 300 L/s during one month seem to be possible if infiltration by the same amount of water is carried out in suitable places within the model area.

Key words: *Feflow 6.1, artificial groundwater recharge, sprinkler infiltration, groundwater modeling.*

Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Sciences. Uppsala University. Villavägen 16, SE-752 36, UPPSALA. ISSN 1401-5765.

FÖRORD

Det här examensarbetet är det avslutande momentet i utbildningen Civilingenjör i miljö- och vattenteknik på Uppsala Universitet och omfattar 30 högskolepoäng. Arbetet har utförts för Norrvatten i anslutning till ett större projekt där Norrvatten undersöker möjligheterna att säkerställa en reservvattenförsörjning under en månad med full kapacitet. Kontaktpersoner vid Norrvatten har varit Maja Taaler-Larsson och Hans Gillsbro. Grundvattengruppen har Norrvattens uppdrag att närmare undersöka möjligheterna till konstgjord grundvattenbildning vid Märstatäkten. Per-Olof Johansson, som är Grundvattengruppens uppdragsledare har varit handledare för examensarbetet. Ämnesgranskare har varit Fritjof Fagerlund och examinator Allan Rodhe från Geovetenskapliga institutionen på Uppsala universitet.

Först och främst skulle jag vilja rikta ett stort tack till min handledare Per- Olof för att ha bidragit med sin tid och kunskap för att hjälpa mig med det här examensarbetet. Jag skulle även vilja tacka Håkan Djurberg från Grundvattengruppen som assisterande handledare för all rådgivning och hjälp. Tack till Duncan McConnachie, GIS- ingenjör på WSP, som varit till stor hjälp genom att hjälpa mig med diverse GIS- frågor när inte Google har kunnat göra det. Ett sista tack vill jag rikta till Norrvatten som hjälpt mig med nya inmätningar av grundvattenrör. Tack till alla er som gjort det möjligt för mig att arbeta med detta otroligt intressanta och lärorika examensarbete.

Copyright © Frida Hammar och Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W-14 012 ISSN 1401-5765

Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala 2014

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Norrvattens reservvattentäkt i Märsta - grundvattenmodellering av försök med konstgjord grundvattenbildning

Frida Hammar

Vatten är den viktigaste och mest livsnödvändiga naturresursen vi har på jorden. Mer än hälften av jordens yta är täckt av vatten. Med det i tanken kan det tyckas vara en oändlig resurs som dessutom är förnybar. Men av allt vatten i världen är det endast några få procent som består av sötvatten. Det mesta sötvattnet är dessutom bundet i form av is i glaciärer eller i marken och kan därför inte utnyttjas av oss. Endast en knapp procent kvarstår av allt vatten till alla människor på jorden att leva av. Därför är det väldigt viktigt att vi bevarar de dricksvattenresurser vi har med en god kvalitet så att även kommande generationer ska kunna ta del av vattnet.

Vatten som dricksvattenresurs hämtas antingen som ytvatten vilket är vatten från till exempel insjöar eller älvar eller också från vatten som lagrats under marken, så kallat grundvatten. Insjöar innehåller oftast en större mängd vatten än en grundvattentäkt men är samtidigt mer utsatta för föroreningar än en grundvattentäkt. På grund av ytvattentäkters exponering till den omgivande miljön behövs det fler reningssteg och behandlingar med kemikalier i ytvattenverk än i verk som använder grundvatten som vattenresurs. I grundvattentäkter har vatten i form av nederbörd infiltrerat ner i marken och på så sätt renats både biologisk, med hjälp av bakteriell nedbrytning, men även fysikaliskt med filtrering genom de olika jordlagren.

Norrvatten som är ett kommunalförbund med 14 kommunmedlemmar ansvarar för vattenförsörjningen i Stockholms norra kommuner. Norrvattens vattenverk heter Görvälnverket och hämtar sitt råvatten (dricksvattnet innan rening) från Mälaren. Om något skulle hända som gör att Norrvatten inte längre kan hämta vattnet från Mälaren, så som ett oljeutsläpp eller liknande, så har Norrvatten fyra grundvattentäkter som kan kopplas in som reserver. Dessa grundvattentäkter skulle dock endast räcka i några dagar i dagsläget. Möjligheten finns för Norrvatten att få uppbackning av Stockholm Vatten, som har hand om vattenförsörjningen för Stockholms övriga kommuner, vid ett eventuellt längre avbrott. Detta sätter dock Norrvatten i en sits som gör dem beroende av att Stockholm Vattens vattenverk fungerar som de ska och har tillräckligt med vatten för att försörja både sig själva och Norrvatten vid en eventuell incident.

För att öka säkerheten i reservvattenförsörjningen, även vid behov över en längre tid, har Norrvatten börjat undersöka möjligheterna för att antingen förstärka de redan existerande grundvattentäkterna med vatten eller att anlägga ytterligare några nya grundvattentäkter. Den inledande undersökningen indikerade att det mest gynnsamma, både ur ekonomiskt och miljömässigt perspektiv, vore att förstärka de befintliga grundvattentäkterna. Märsta grundvattentäkt var en av dem som hade bäst förutsättningar för konstgjord grundvattenbildning. Konstgjord grundvattenbildning innebär att man förstärker den naturliga grundvattenbildningen genom att tillföra råvatten från till exempel en närliggande sjö som sedan får infiltrera ner i marken och genomgå en naturlig rening. Detta kan användas för grundvattentäkter som inte har tillräckligt hög kapacitet eller för att förbättra vattenkvaliteten i grundvattentäkten.

Det finns olika metoder att utföra konstgjord grundvattenbildning på och den metod som har valts för detta projekt är så kallad sprinklerinfiltration. Plastslangar med små hål läggs ovanpå ett lämpligt infiltrationsområde vid grundvattentäkten med hög genomsläpplighet och lämpligen i ett högområde. Detta för att vattnet ska få gå igenom ett så tjockt gruslager som möjligt och på så vis maximeras reningseffekten. Råvattnet skulle i det här fallet hämtas från Fysingen, en närbelägen sjö. Metoden anses vara skonsam mot marken och den omkringliggande naturen då slangarna kan läggas ut antingen för hand eller med hjälp av lättare maskiner.

Avsikten var att provpumpning och infiltrationsförsök skulle genomföras under år 2013 och att resultatet från dessa försök sedan skulle användas vid kalibrering av den grundvattenmodellering som det aktuella examensarbetet gäller. På grund av förseningar vad gäller tillstånd för försöket från myndigheter och markägare har försöket ännu inte kunna påbörjas. Grundvattenmodelleringen har därför fått baseras på material från tidigare undersökningar.

Syftet med projektet är att med hjälp av en grundvattenmodell över undersökningsområdet kunna förutsäga hur grundvattennivåerna i grundvattenmagasinet reagerar på infiltration och uttag som ger Norrvatten en betydande del av den totala mängden som behövs för att ersätta Görvälnverket under en månads tid.

Till en början bestämdes områdets grundvattendelare och alltså det området som bidrar till grundvattenflödet i åsen. Detta gjordes med hjälp av höjddata, befintlig ytvattendelare och jordartskartan där områden med låg hydraulisk konduktivitet så som bergsområden ansågs som lämpliga grundvattendelare. Sedan byggdes modellen upp av en generisk lagerföljd som grund med ett låggenomsläppligt berglager som nedersta lagret och organiskt material som det översta lagret. De olika jordarterna tilldelades värden på den hydrauliska konduktiviteten och även populärvetenskapliga värden på vattengenomsläpplighet och lagringsförmåga.

Modellen kalibrerades först för stationära förhållanden, d.v.s. förhållanden som inte förändras över tid. Kalibreringen gav en fingervisning om huruvida rimliga K-värden använts vid uppbyggandet av modellen och var den parameter tillsammans med infiltrationsmotståden mellan Fysingen och grundvattentäkten som justerades. Värden från en tidigare provpumpning utförd av Norrvatten användes även för att kalibrera under föränderliga, så kallade förhållanden som ändras med tiden.

Efter simuleringar av de olika scenarierna kan konstateras att ett uttag, utan infiltration, med 100L/s under tidsperioden en månad inte är lämpligt då det kommer leda till en försämring av grundvattenkvaliteten med avseende på hårdhet och kloridhalt. De båda scenarierna med uttag och infiltration av 150 L/s respektive 300 L/s visade mer lovande resultat i modellen med avseende på avsänkningen av grundvattennivåer och inflöden från Fysingen. Detta bör dock verifieras med hjälp av infiltrationsförsök i fält då modellens resultat har en viss osäkerhet.

ORDLISTA

Hydraulisk gradient - Grundvattenytans lutning för en öppen akvifer och den hydrauliska potentialytans lutning för en sluten akvifer.

Feflow 6.1 - Programvara som används främst för modellering av grundvattenflöden, grundvattnets ålder, värmetransport och transport av lösliga ämnen i mark.

Grundvattendelare – Det område, inom ett inströmningsområde, där grundvattenytan ligger som högst.

Transienta förhållanden – Förhållanden som varierar över tiden.

Stationära förhållanden - Konstanta förhållanden, oberoende av tiden.

Hydrogeologisk konceptuell modell – Modell som beskriver grundvattenförhållandena i ett aktuellt område och står som grund för den matematiska modellen.

Stalp – Brant sluttning eller klippvägg.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT	i
FÖRORD	iii
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	iv
ORDLISTA	vi
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	vii
1 INLEDNING	1
1.1 SYFTE	2
2 BAKGRUND	3
2.1 MÄRSTA GRUNDVATTENTÄKT	3
2.2 OMRÅDESBESKRIVNING	5
2.3 KONSTGJORD GRUNDVATTENBILDNING	7
2.3.1 Sprinklerinfiltration	7
3 METOD	8
3.1 UNDERLAGSGRUNDER	8
3.1.1 Uppbyggnad av lagerföljd	8
3.1.2 Fältundersökningar	9
3.2 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL	11
3.2.1 Områdesavgränsning	12
3.2.2 Randvillkor	12
3.2.3 Grundvattenbildning	13
3.3 MATEMATISK HYDROGEOLOGISK MODELL	14
3.3.1 Kalibrering	15
3.3.2 Simulering av infiltrations- och uttagsscenarier	16
4 RESULTAT	19
4.1 UNDERLAGSGRUNDER	19
4.1.1 Fältundersökning	19
4.2 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL	19
4.2.1 Grundvattenbildning	19
4.3 MATEMATISK HYDROGEOLOGISK MODELL	20
4.3.1 Kalibrering	21
4.3.1 Simulering av infiltrations- och uttagsscenarier	24
5 DISKUSSION	30

5.1 FÄLTUNDERSÖKNING	30
5.2 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL	30
5.2.1 Grundvattenbildning	31
5.3 MATEMATISK HYDROGEOLOGISK MODELL	31
5.3.1 Simulering av infiltrations- och uttagsscenarier	33
5.4 VIDARE UNDERSÖKNINGAR	35
5.4.1 Fältundersökningar	35
5.4.2 Kalibrering	35
6 SLUTSATS	37
REFERENSER	38
BILAGA A	40
BILAGA B	42
BILAGA C	44

1 INLEDNING

Den ökande tillväxten och utbyggnaden av våra städer medför större krav och påfrestningar på våra befintliga dricksvattenresurser. Överföringsledningar mellan vattenverken gör det möjligt för framför allt de större verken att ge tillfälligt stöd åt närliggande vattenverk i behov av mer vatten. Det ökande behovet och utnyttjandet av våra vattentäkter liksom potentiellt förorenade aktiviteter i tillrinningsområdena gör hela dricksvattensystemet mer sårbart. Det är därför viktigt att undersöka möjligheterna för att ersätta eller stödja befintliga vattentäkter vid ett eventuellt ledningsbrott eller förorening av dessa.

Norrvatten är ett kommunalförbund som förser över en halv miljon människor i 14 kommuner i norra Stockholms län med dricksvatten. Vattnet hämtas från Mälaren vid Görvålnverket. För att kunna säkerställa leveransen till sina kunder vid avbrott från Görvålnverket har Norrvatten idag fyra reservgrundvattentäkter (Märsta, Rotsunda, Hammarby och Ulriksdal) som alla är belägna i Stockholmsåsen. Dessa grundvattentäkter har hög kapacitet men grundvattentillgången vid längre uttag, gällande vattendomar och risken för att försämra grundvattenkvaliteten begränsar uttagsmöjligheterna för Norrvatten. Skulle något hända med Norrvattens vattenverk, Görvålnverket, som omöjliggör en vattenleverans till kunderna under en längre tid skulle dessa reservgrundvattentäkter i dagsläget inte kunna täcka upp hela Görvelnverkets vattenproduktion (Grundvattengruppen, 2008).

Norrvatten har även möjlighet att få uppbackning av Stockholm Vatten med ungefär 60 % av sitt fulla behov på 130 000 m³/d (~1500 L/s) då en dubbelriktad överföringsmöjlighet finns mellan näten (Grundvattengruppen, 2008). Det gör dock att Norrvattens reservvattenförsörjning är beroende av att Stockholm Vatten har möjlighet att leverera den mängd vatten som behövs. Norrvattens mål för att ytterligare förbättra leveranssäkerheten till sina kunder är att vara självförsörjande även vid en incident som orsakar en månads driftstopp i Görvålnverket.

Tillsammans med Grundvattengruppen gjorde Norrvatten år 2008 en utredning om möjligheterna för att inrätta nya reservgrundvattentäkter men även att förstärka de befintliga med hjälp av konstgjord grundvattenbildning. I utredningen framgick att Märsta grundvattentäkt, en av de existerande reservvattentäkterna, var lämplig att förstärka med konstgjord grundvattenbildning. Med hjälp av befintligt undersökningsmaterial och kompletterande fältrekognoseringar pekades några lämpliga infiltrationsplatser ut i området.

Runt Märsta grundvattentäkt finns det två lämpligt belägna platser från vilket råvatten ska kunna hämtas och användas för infiltrationen. Dessa två områden är sjön Fysingen och Skarven som är en vik av Mälaren. Ett vattenuttag från Fysingen ansågs vara lämpligt då Fysingen ligger alldeles intill infiltrationsområdena. Miljöpåverkan är dock större vid ett uttag från Fysingen än om man istället tar vattnet från Skarven som har ett större ytvattenmagasin. Uttaget skulle inte orsaka några större avsänkningar av Fysingens vattenstånd och uttaget skulle därför inte innebära någon nämnvärd negativ påverkan på Fysingens vattenkvalitet eller för djurlivet i sjön (Grundvattengruppen, 2012b). På grund av att det är större risk att Skarven utsätts för föroreningar och den ringa miljöpåverkan som ett uttag ur Fysingen skulle innebära, har därför Fysingen preliminärt pekats ut som källa för infiltrationsvattnet. Vid infiltrationsförsöket, då anläggningen testas, kommer dock rent vatten från Norrvattens ledningar att användas (Grundvattengruppen, 2012b).

Den metod som ska användas för infiltrationen är så kallad sprinklerinfiltration. Den har från tidigare försök visats sig vara skonsam ur miljöskyddssynpunkt. Infiltrationsrören anläggs manuellt eller med lättare maskiner (Grundvattengruppen, 2012b).

Märsta grundvattentäkt har, ur hydrogeologiska synpunkt, bedömts vara den av Norrvattens fyra reservvattentäkter bäst lämpade vattentäkten för att använda konstgjord grundvattenbildning på. Området ligger dock inte på kommunal mark och därför erfordras tillstånd från markägaren både för att utföra infiltrationsförsöket och för uppförandet av själva infiltrationsanläggningen. Under projektets gång fick Norrvatten avslag från markägaren. Resultaten från det här projektet har därför inte kunnat verifieras av några verkliga infiltrationsförsök. Modelleringen i detta projekt kan istället fungera som en prognos för framtida försök i fält.

1.1 SYFTE

Med hjälp av en matematisk grundvattenmodell undersöktes hur tre olika uttags- och infiltrationsscenarier (uttag av 100 L/s utan infiltration samt infiltration och uttag med 150 L/s respektive 300 L/s) påverkade grundvattennivåerna i Märsta grundvattentäkt. Syftet med projektet var främst att se hur ett uttag, stort nog för att ha ett betydande bidrag till Norrvattens reservvattenförsörjning, påverkade grundvattennivåerna samt analysera eventuella effekter av dessa nivåändringar såsom bland annat ytavrinning och påverkan på grundvattenkvaliteten.

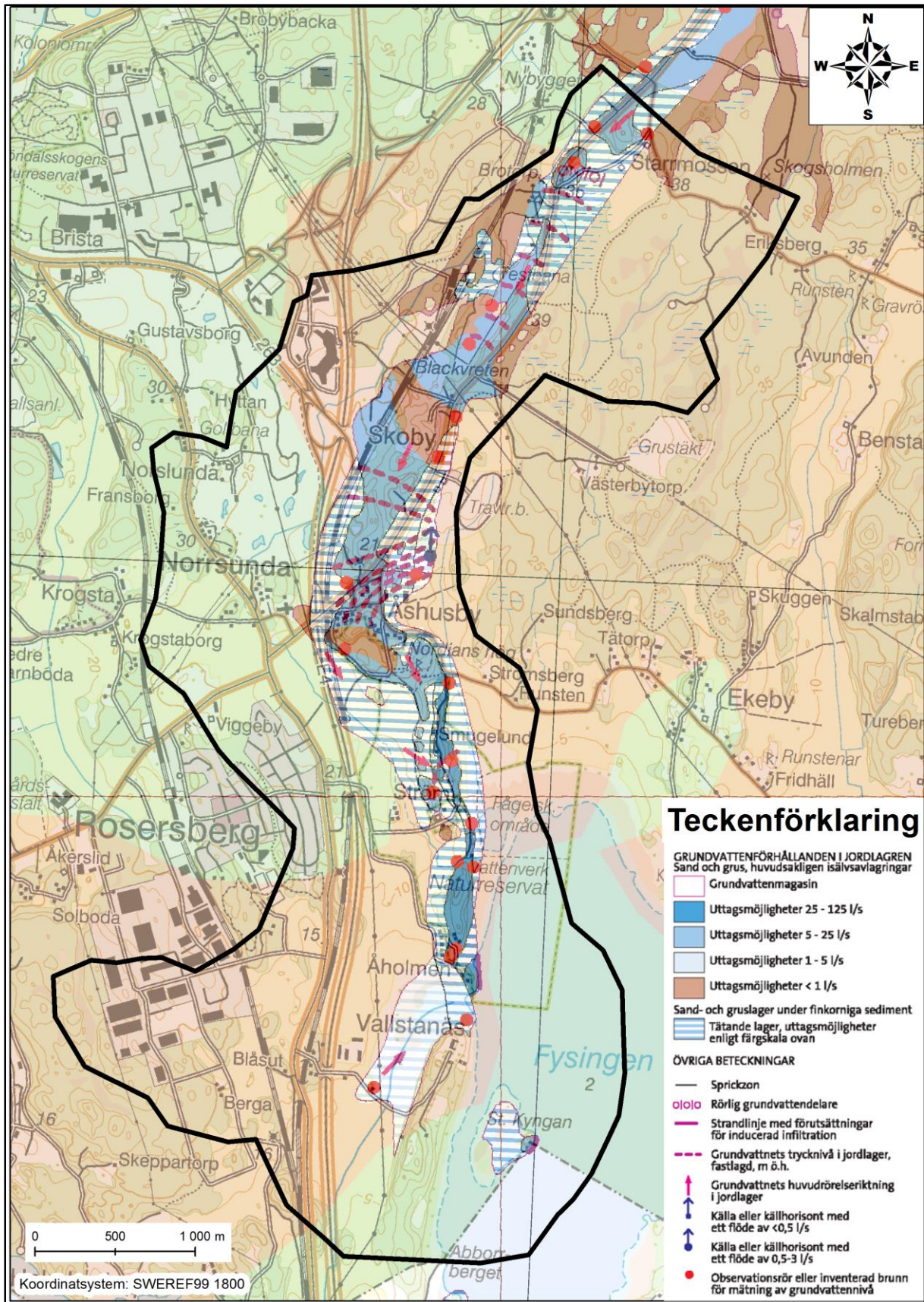
2 BAKGRUND

2.1 MÄRSTA GRUNDVATTENTÄKT

Grundvattentäkten i Märsta är Norrvattens nordligaste reservgrundvattentäkt och är belägen i Stockholmsåsen (Figur 1). Vattentäkten användes tidigare till att förse närområdet med dricksvatten men tas idag i bruk endast vid reservbehov. Vattnet har en kloridhalt på 37 mg/L vilket anses som ett normalt värde för att vara i det området av Stockholmsåsen (Grundvattengruppen, 2008). Grundvattnet har ett pH-värde på 7,1 och anses som hårt (14,8 °dH). Vattenkvaliteten är trots det god men skulle gynnas ytterligare av konstgjord grundvattenbildning som skulle bidra till en minskad hårdhet och även minskad uranhalt.

Under 1960-talet då vattentäkten var i bruk tenderade vattnets hårdhet och kloridhalt att bli för hög, med maximal kloridhalt runt 380 mg/L. Medeluttaget var då 40 L/s och den förhöjda salthalten ansågs bero på att salt vatten från djupare delar av åsen blandats in i vattnet. Detta löstes genom att fördela uttaget på två platser, dels vid vattenverket vid Åholmen där uttaget sker idag, dels vid en schaktbrunn vid Ströms gård längre söderut. Åtgärden gjorde att kloridhalten vid Ströms gård sänktes till ungefär 120 mg/L och vid uttaget vid Åholmen låg värdet på ca 80 mg/L. Vid en mätning 7 månader efter åtgärden hade kloridhalten stigit till 250 mg/L vid Ströms gård och 150 mg/L vid Åholmen (WSP, 2004).

Enligt gällande vattendom (Vattendomstolen VA 52/76, 1979-02-15) får maximalt 300 L/s tas ut från Märstas grundvattentäkt under några dagars tid, dock inte mer än 100 000 m³/månad (38 L/s) eller 300 000 m³/år (9,5 L/s).



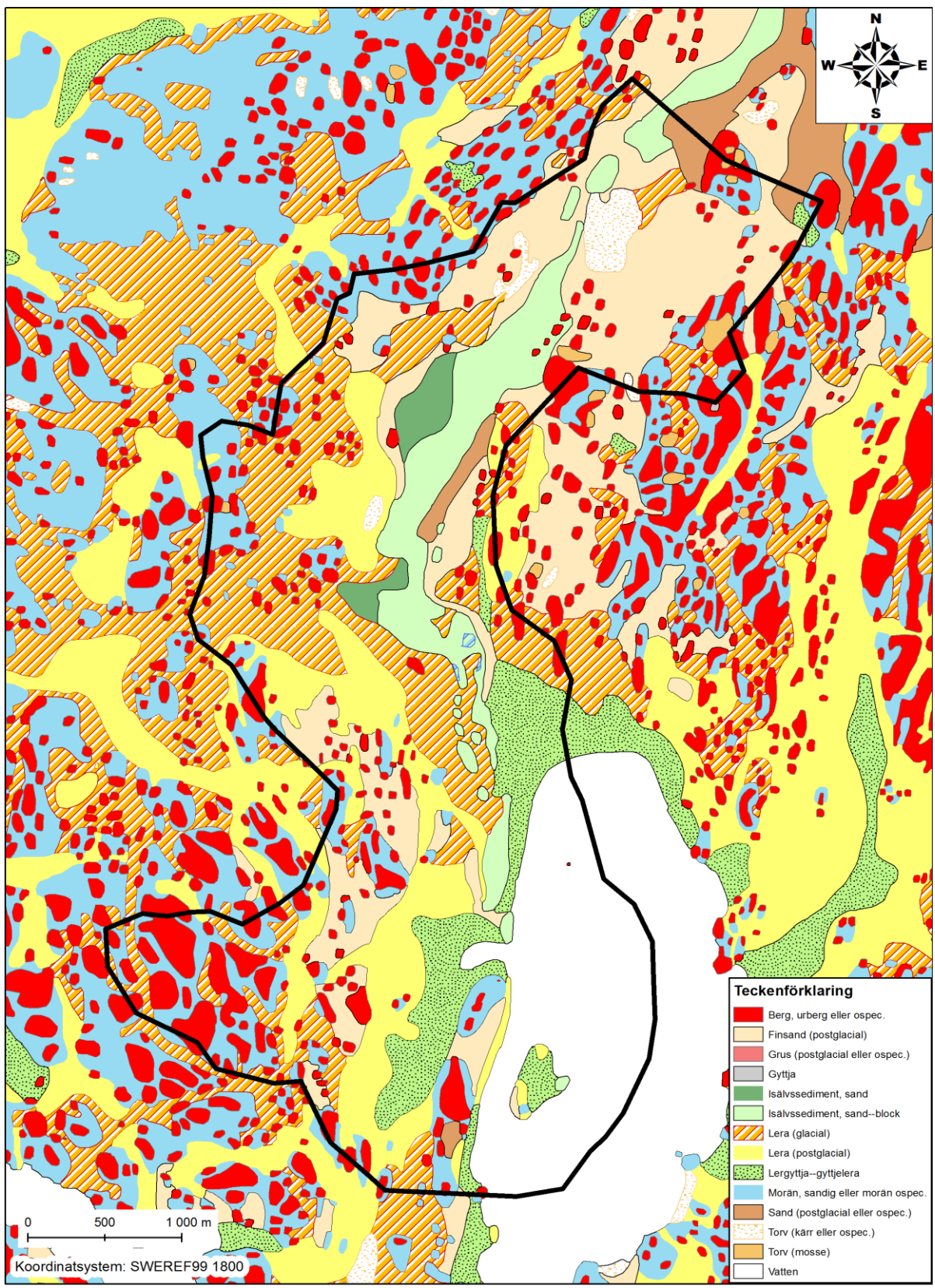
Figur 1. Hydrogeologisk karta över Märstagrundvattentäkt. Magasinets avgränsning bestämdes i avsnitt 3.2.1 (© Sveriges Geologiska Undersökning, © Lantmäteriet).

2.2 OMRÅDESBESKRIVNING

Grundvattentäkten ligger i Fysingens naturreservat, strax söder om Arlanda, där delar av området är naturreservat och kulturminnesområde. Landskapet utgörs främst ut av åskullar, betesmark och kulturlandskap och området är bland annat känt för sitt höga kulturvärde på grund av de fornnordiska gravarna som finns i området. Den mest kända av dessa är den cirka 10 meter höga hövdingagraven Nordians hög, som tros ha skapats någon gång under 500- eller 600- talet (Stockholm läns museum, 2013). Sjön Fysingen är med sitt rika fågelliv ett väldigt uppskattat besöksmål för många fågelskådare då det är ett av länets fågelrikaste områden.

Grundvattenmagasinets sträcker sig från en fast grundvattendelare i norr, belägen strax norr om Starrmossen där den gränsar till Arlandastad Golfs vattentäkt, till den södra avdelaren strax norr om Löwenströmska sjukhuset (SGU, 2013b, Grundvattengruppen 2012b) (Figur 1).

Jordarterna i området utgörs främst av lera i dalområdena som omsluter åsryggen som består av sand och grusmaterial. Längs med åsen finns även några mindre områden med torv och framför allt i den norra delen, överlagras och övergår isälvs materialet i finsand som breder ut sig både åt väster och öster (Figur 2). I högområdena omges berg i dagen mestadels av moränmark. Tidigare undersökningar visar på att det troligtvis finns en brant bergtröskel eller ett så kallat stalp som går tvärs över åsen ungefär vid Åshusby (Figur 1). Stalpet dämmer grundvattnet uppströms och består troligtvis av ett material med låg hydraulisk konduktivitet såsom lera eller berg.



Figur 2. Jordartskartan 1:50 000 med modellområdet markerat (redogörs för i avsnitt 3.2.1) (© Sveriges Geologiska Undersökning).

2.3 KONSTGJORD GRUNDVATTENBILDNING

Konstgjord grundvattenbildning används främst för att förstärka den naturliga grundvattenbildningen genom att öka mängden vatten som infiltrerar ner i marken. Metoden är även ett bra sätt att förbättra vattenkvaliteten på vattnet, både det som infiltrerar och det vatten som redan uppehåller sig i grundvattentäkten. Efter infiltration i marken passerar vattnet igenom de olika jordlagren och renas på så vis, innan det till slut hamnar i grundvattenzonen (Hanson, 2000).

Avståndet mellan brunnar och infiltration är en viktig parameter att beakta vid planering av infiltrationsanläggningar för att uppehållstiden för vattnet ska bli tillräckligt lång för att få högsta möjliga reningsgrad. Det är även viktigt att infiltrationen sker i en del av åsen som är högt belägen med material av hög genomsläpplighet så att man får en god genomströmning av det infiltrerade vattnet och en omättad zon med stor mäktighet vilket också ökar vattnets uppehållstid.

Det finns flera metoder för konstgjord grundvattenbildning (Hanson, 2000) men här beskrivs endast sprinklerinfiltration som är den metod som kommer att användas i det aktuella projektet.

2.3.1 Sprinklerinfiltration

Konstgjord grundvattenbildning är ingen ny metod. Den första infiltrationsanläggningen i Sverige togs i drift i Göteborg redan år 1898. Sprinklerinfiltration är dock en relativt ny metod i Sverige och introducerades i form av pilotanläggningar först i början av 2000-talet (Hanson, 2000). Vattnet sprids jämnt över marken med hjälp av ett sprinklersystem (Figur 3). Syftet med metoden är att efterlikna en naturlig grundvattenbildning från regn. Systemet består av hålförsedda plastledningar som kan läggas ut och flyttas för hand eller med hjälp av lättare maskiner och behöver på så sätt inte orsaka några större ingrepp i det berörda området (Grundvattengruppen, 2012b). Vattnet kan tas direkt från en ytvattentäkt i närheten av infiltrationsområdet eller, vid behov, förbehandlas beroende på ytvattnets kvalitet (Hanson, 2000).

Det är viktigt att vara uppmärksam på eventuell ytavrinning vid infiltrationsförsöken då de förhöjda grundvattennivåerna kan orsaka försumpning och skador på omgivande mark. Om detta skulle inträffa måste sprinklerören omdistribueras bort från den mättade marken till ett mer lämpligt område (Norrvatten, 2012).



Figur 3. Sprinklerinfiltration från försök i Örebro, här med 100 L/s (Foto: P-O. Johansson, 2012).

3 METOD

För att kunna undersöka hur det aktuella grundvattenmagasinet reagerar på väsentligt större infiltration och uttag kan simuleringar genomföras med en matematisk modell. I modellen ingår kalibrering mot mätta data och simulering av olika infiltrations- och uttagsscenarioer. Den programvara som använts är Feflow (version 6.1). Som underlag används den konceptuella modellen. I den matematiska modellen ingår kalibrering av grundvattentillstånden, upprättande av randvillkor och scenarioanalys (von Brömsen m.fl., 2006). Kalibrering och simulering av den uppbyggda modellen gjordes med hjälp av Feflow 6.1 som har utvecklats utav DHI-WASY GmbH som är den tyska filialen av DHI group (Feflow, 2013).

3.1 UNDERLAGSGRUNDER

En förutsättning för att kunna skapa den konceptuella modellen, som ligger till grund för den matematiska modellen, var att ha tillräckligt med underlagsdata. Underlagsdata erhöles från tidigare undersökningar i området och även från egna fältundersökningar där grundvattennivåerna uppmättes.

3.1.1 Uppbyggnad av lagerföljd

Den konceptuella modellen som beskriver Märsta grundvattentäkten skapades till en början med hjälp av ArcGis. Sex olika lager användes för uppbyggnaden av modellen i form av höjddata (2 metersdata) och terrängkarta från Lantmäteriet samt hydrogeologisk karta och jordartskarta från SGU. Observationsrör och uttagsbrunnar lade in som punkter utifrån information om deras koordinater.

Bergsyntans topografi skapades med hjälp av information från de borrhningar som gjorts i området och där det fanns information om djupet ner till berg eller block. Från SGU erhöles även information från sex seismikprofiler som användes vid skapandet av bergytan. Tillsammans med information om markytans läge över havet räknades bergytans läge över havsnivån ut och värdena lades in som punkter, med hjälp av kända koordinater, på kartan. För de områden som hade berg i dagen erhöles istället höjderna från den terrängmodell som skapats från den vektoriserade höjddatafilen. Närmast åsen studerades även mätningar av grundvattennivåerna. Detta gjordes för att säkerställa att bergytan under marken inte sattes till en högre nivå än grundvattenytans nivå och på så vis avskärmade åsen.

Längs med åsens östra sida uppskattades bergytans djup till 20 meter under havsnivån utifrån information från seismiskprofiler i detta område. Denna nivå extrapolerades även längre ut i sjön då ingen känd information om djupet ner till berget från geofysiska undersökningar fanns för dessa områden. Från åsen västra sida och upp mot bergsområdena interpolerades några värden för berggrunden för hand innan punktfilen interpolerades till en kontinuerlig bergsyta.

Interpolationen gjordes med hjälp av *spatial analysis tool* och metoden IDW (Inverse Distance Weighted). ArcGis har flera olika interpolationsmetoder som använder sig av olika sätt för att estimerar data emellan kända punkter. För att få den mest korrekta skattningen över bergytan jämfördes resultatet från olika interpolationsmetoder i ArcGis och höjden enligt IDW ansågs stämma bäst överens med de mätpunkter som ritats ut.

Den topografiska kartan och den interpolerade bergytans karta tillsammans med observationsrören, grundvattendelaren, jordartskartan, grundvattenbildningen och en terrängkarta kunde sedan importeras till Feflow.

3.1.2 Fältundersökningar

Vid två tillfällen gjordes fältundersökningar i form av egna grundvattennivåmätningar. Rören som mättes valdes ut baserat på att det fanns tidigare mätningar att jämföra med, utförda år 2012, då rören dessutom funktionstestades. En så god täckning som möjligt eftersträvades inom modellområdet. De rör som mätningarna utfördes i har markerats med en röd ring i Figur 4. Mätningen gjordes med hjälp av ett mätlod som mäter nivå och temperatur (Figur 5). Mätlodet sänktes ner i röret och avståndet från rörets överkant till grundvattenytan mättes samt avståndet till från rörets överkant till markytan.



Figur 4. Grundvattenrören är distribuerade främst längs med grusåsen. De rör som markerats med namn användes vid kalibreringen av stationära förhållanden. Egna grundvattenmätningar utfördes i de rör som markerats med en röd ring runt rörets namn. Den svarta, streckade linjen visar stalpets ungefärliga läge i modellområdet. (© Sveriges Geologiska Undersökning).



Figur 5. Mätning av grundvattenytan i observationsrören och inmätning av rören.

Vid två olika tillfällen utfördes även inmätningar av några av rören. Inmätning av absoluthöjd (RH2000) gjordes med GPS/GNSS och instrumentet Trimble GeoXR. Inmätningen gjordes för rörets överkant för några grundvattenrör för att säkerställa att de uppmätta grundvattennivåerna översattes korrekt till nivåer i meter över havet.

I området vid stalpet, som är en tröskel under isälvmaterialet norr om Åshusby, ska det enligt SGU:s grundvattenkarta finnas ett utströmningsområde i form av en källa eller källhorisont med ett utflöde av 0,5- 3 L/s (Figur 1). Området undersöktes vid fältundersökningen och flera vattensamlingar hittades men dock inget tydligt utströmningsområde vilket kan ha berott på låga grundvattennivåer vid undersökningstillfället (2013-11-11).

3.2 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL

En förutsättning för att kunna utföra grundvattenmodellering i Feflow är att en konceptuell modell skapas som beskriver områdets hydrologiska och hydrogeologiska förhållanden (von Brömsen m.fl., 2006). Den konceptuella modellen, som står som grund för den matematiska modellen, byggdes upp med hjälp av:

- Höjddata (digital terrängmodell)
- Hydrogeologisk karta
- Fastighetskarta
- Terrängkarta
- Jordartskarta
- Borrningar (i huvudsak utförda av konsultfirman Orrje och Co)
- Uppskattning av grundvattenbildning (se avsnitt 2.2.3)
- Avrinningsområdets avgränsning (se avsnitt 2.2.1)
- Grundvattennivåobservationer

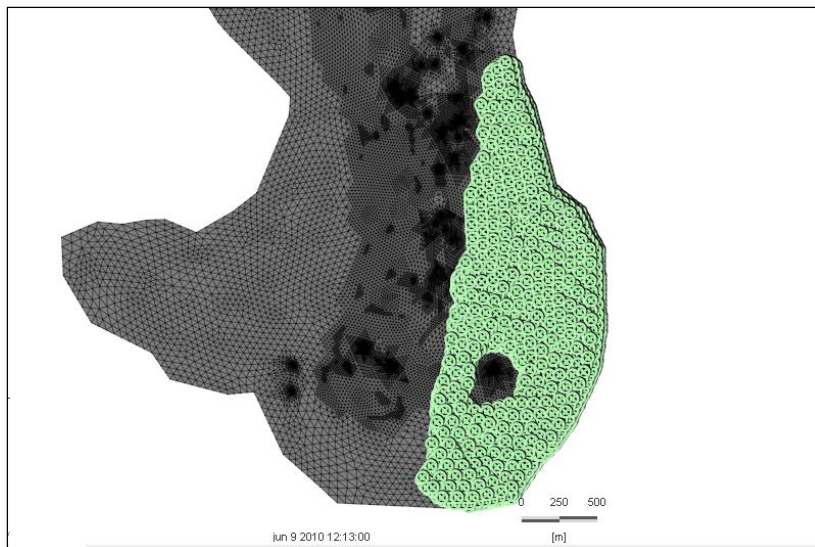
Den digitala terrängmodellen och terrängkartan användes för att skapa utformningen på modellens markyta och bergsytan skapades med hjälp av den hydrogeologiska kartan tillsammans med jordartskartan och information från borrningar. Fastighetskartan, jordartskartan och avrinningsområdets avgränsning användes till att bestämma områdesavgränsningen. Modellen kalibrerades med hjälp av grundvattennivåobservationer i fält.

3.2.1 Områdesavgränsning

Nedan beskrivs den avgränsning som gjordes av modellområdet och gränsernas egenskaper (Figur 2). Den västra områdesavgränsningen följer ytvattendelaren. I svenska moränlandskap kan man ofta anta att ytvattendelaren sammanfaller med grundvattendelaren då berggrunden utgörs av relativt få sprickor och jordtäcknet är tunt i höjdområdena (Grip och Rodhe, 1985). I detta område finns det mycket berg i dagen som troligtvis hindrar ett inflöde av grundvatten och kan därför anses vara en trolig avgränsning. Även den södra grundvattendelaren följer en rygg med berg i dagen och fortsätter sedan ut i sjön. Då det inte finns någon synlig fysisk avgränsare i sjön finns det en viss osäkerhet över den södra avgränsarens läge här. Den östra modellområdesgränsen har delvis lagts i sjön Fysingen. Åsens utsträckning under sjön är osäker men på ön Stor Kyngan går isälvmaterialet i dagen (SGU, 2013a). Den östra gränsen har därför lagts som en *no flow* avgränsning ungefär mitt i sjön. Den östra avgränsningen fortsätter sedan norrut där den till en början sammanfaller med den bäck som rinner in norr om Fysingen. Denna valdes som gräns då den kan antas vara en recipient av grundvatten och alltså hindrar grundvattnet från att strömma vidare västerut. Längre norrut svänger avgränsningen av österut mot berg i dagen då området innanför bergsområdet bestod av ett område med finsand som bedömdes kunna bidra med grundvatten till åsen.

3.2.2 Randvillkor

Utöver att tilldela materialegenskaper (såsom grundvattenbildning och hydraulisk konduktivitet) för modellen upprättades randvillkor för modellen gränser. För områdets samtliga yttersta avgränsningar (norra, södra, östra och västra) antogs inget flöde ske över gränserna och alltså tilldelades ett så kallat *no flow* randvillkor i dessa områden. Då den nordöstra, södra och norra avgränsningen består av hög topografi och i princip impermeabelt berg ansågs detta som ett troligt randvillkor (Anderson, 1992). Avgränsningen som går genom Fysingen antas inte heller ha något flöde över sig då sjöns vatten troligen inte bidrar till grundvattenbildningen utan snarare är ett utströmningsområde för grundvattnet under naturliga förhållanden. Istället sker grundvattentillströmningen från sjön bottensediment varför ett Cauchy randvillkor ansattes (Figur 6). Randvillkoret kan användas i fall där det finns en kontakt, genom ett medium, mellan en akvifer och grundvattenmagasinet som till exempel vid läckage från sjöar. Cauchy villkoret relaterar flödet genom randen till sjöns vattenstånd och kombineras samtidigt med en ansättning av den hydrauliska konduktiviteten i mediet mellan sjö och grundvattenmagasin. (Anderson, 1992). Vid den stationära kalibreringen och simuleringen av scenarier ansattes vattenståndet till den nivå som uppmättes under fältundersökningen. Vid den transienta kalibreringen ansattes en nivå för att få samma gradient mellan sjö och grundvattennivåer som rådde under pumpförsöket.



Figur 6. Ett Cauchy villkor lades över Fysingen (det grönmärkerade området) med ett konstant vattenstånd.

3.2.3 Grundvattenbildning

Grundvattenbildningen i Sverige sker främst genom perkolation av nederbördsvatten från de mättade ovanliggande jordlagren och kan uppskattas för olika jordarter genom bland annat vattenbalansberäkningar (Rodhe m.fl., 2004). För att kunna uppskatta grundvattenbildningen för områden användes värden från en tidigare undersökning där en konceptuell modell gjorts över Arlandas akviferlager (Tabell 1). Värdena beräknades med hjälp av vattenbalansen där genomsnittliga värden på årsnederbörden på 588 mm och årsmedelavdunstningen på 400-500 mm använts. Utifrån bland annat den information uppskattades avrinningen till 210 mm/år vilket kan antas vara lika stort som den genomsnittliga grundvattenbildningen i området. Jordarter med grövre material erhöles en grundvattenbildning över detta värde och jordarter med finare material ett lägre värde än genomsnittsvärdet (Grundvattengruppen, 2012a). Eftersom Märstaområdet gränsar till Arlanda grundvattentäkt antogs dessa värden vara användbara även för att uppskatta grundvattenbildningen i Märsta grundvattentäkten.

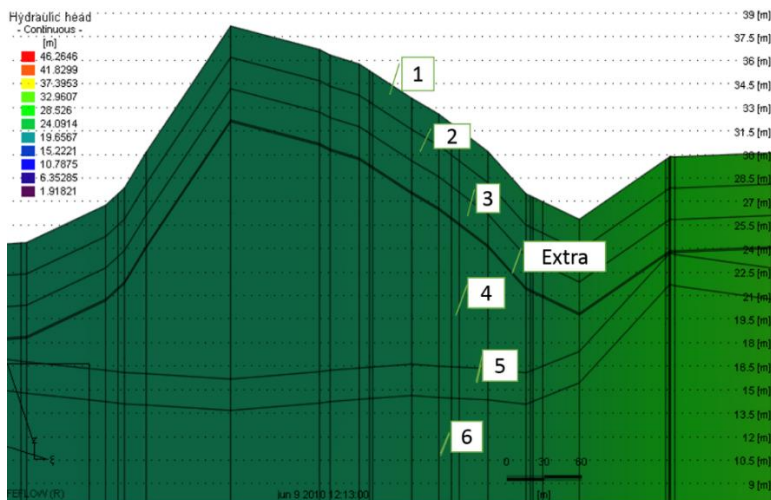
Med hjälp av jordartskartan delades varje jordart in efter de grupper som framgår av Tabell 1 med hjälp av ArcGis. Arean för varje jordartsklass beräknades och multiplicerades sedan med respektive grundvattenbildning. Dessa lades sedan ihop för att få fram den totala grundvattenbildningen för området som blev cirka 44 L/s. Detta är av samma storlek som då konsultfirman Orrje och Co under 50-talet till början av 60-talet utförde omfattande undersökningar i form av bland annat propumpningar vid Ströms gård (Orrje & CO, 1961).

Tabell 1. Ursprungliga värden för grundvattenbildningen för respektive jordart. Dessa användes sedan för att beräkna den totala grundvattenbildningen för hela området (Grundvattengruppen 2012a).

Jordart	Area [m ²]	Grundvattenbildning (mm/år)	Grundvattenbildning (L/s)
Isälvsediment	1,48·10 ⁶	250	11,76
Postglacial sand och grus	3,26·10 ⁶	125	12,91
Lera	6,31·10 ⁶	20	4,00
Org. Jordar (torv, gyttja)	0,24·10 ⁶	20	0,15
Berg- och moränområde	2,30·10 ⁶	210	15,32
			Σ 44,14

3.3 MATEMATISK HYDROGEOLOGISK MODELL

Den avgränsning av modellområdet som gjordes i den konceptuella modellen överfördes till den matematiska modellen. Modellen tilldelades sex lager i enlighet med den generiska lagerföljdsmodell som används i den konceptuella modellen (Tabell 2). Utöver de sex lagren lades även ett extra lager in i Feflow, ovanpå isälvs materialet, med en lagertjocklek på 10 cm. Detta gjordes för att få en mindre skarp övergång i z-led vid tilldelning och interpolation av den hydrauliska konduktiviteten som till exempel mellan isälvs material och lera. Den matematiska modellen består alltså av sju lager (Figur 7).



Figur 7. Modellen består av sju lager där sex skapats från en generisk jordlagerföljd. Det sjunde, extra lagret är ett mycket tunt lager på 10 cm och lades till för att öka modellens stabilitet genom att underlätta interpolationen mellan områden med hög och låg hydraulisk konduktivitet.

Modellen upprättades i Feflow som en 3D-modell som sammanlagt (inklusive alla lager) bestod av över 600 000 finita element och hade en modellyta som motsvarar 15,5 km². Antalet element kan justeras för att ge en ökad stabilitet i områden som anses känsliga på grund av till exempel stora variationer i hydraulisk konduktivitet. I programmet kan bland annat materialegenskaper (såsom hydraulisk konduktivitet och vattenavgivningstal), randvillkor och flödesvillkor ansättas. De fem översta lagergränserna tilldelades samma topografiska utformning som markytan genom att det översta lagrets utformning kopierades till de tre efterföljande lagren, ned till isälvs materialet. Med samma antagande utformades de två understa lagen efter bergytans topografi. Vid upprättandet av modellen ansattes vardera jordlager till 2 meters tjocklek förutom för isälvs materialet som erhölet en mäktighet på 10 m vilket gav jordprofilen en mäktighet på ca 20 m. Berglagret sattes till en tjocklek på 50 m. Utifrån information från jordartskartan tilldelades varje jordart ett värde på den hydrauliska konduktiviteten där $K_x = K_y = K_z$ antogs (Tabell 2). Dessa tilldelades det översta lagret på modellen och kopierades sedan ner till de andra lagren förutom moränlagret (lager 5) och berglagret (lager 6) som till en början tilldelades homogena och konstanta K-värden på $1 \cdot 10^{-6}$ m/s respektive $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Justeringar gjordes därefter manuellt av den hydrauliska konduktiviteten i vissa områden för att anpassa värdena till de verkliga jordlagerförhållandena. Detta gjordes bland annat vid stalpet som troligtvis fungerar som ett dämme mitt i grundvattenmagasinet (Figur 11). Här lades ett område med låg hydraulisk konduktivitet, i storleksklass med lera, i samtliga lager förutom i det översta. Modellen översta lager tilldelades uppskattade värden på grundvattenbildningen beroende på jordart enligt Tabell 2.

Tabell 2. Den generiska jordlagerföljden och typvärden på den hydrauliska konduktiviteten (Sweco 2008, 2009).

Lagerföljd	Jordart	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
1	Organiskt material	10^{-7} - 10^{-10}
2	Svallmaterial	10^{-2} - 10^{-6}
3	Silt och lera	10^{-6} - 10^{-9}
4	Primärt Isälvsmaterial	10^{-1} - 10^{-4}
5	Morän	10^{-6} - 10^{-9}
6	Bergyta	10^{-7} - 10^{-10}

Modellen har modellerats som en öppen akvifer (unconfined) med den specifika magasin-koefficienten (Specific storage i Feflow) $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ och vattenavgivningstalet (Specific yield eller Drain-/fillable porosity i Feflow) på 0,2 för hela modellområdet. Vattenavgivningstalet anger den andel vatten som dräneras vid avsänkning av grundvattenytan och den specifika magasin-koefficienten är den volymen vatten som avges vid en meters avsänkning av grundvattenytan (Franklin, 2005). I en öppen akvifer är vattenavgivningstalet den dominerande lagringstermen och inverkan av den specifika magasin-koefficienten kan i det här fallet försummas (Feflow, 2014). Vattenavgivningstalet på 0,2 kan ses som ett medelvärde för hela modellen då det grövre materialet troligtvis har ett högre värde och de finare materialen har betydligt lägre värden (Johnson, 1967).

3.3.1 Kalibrering

Modellen kalibrerades för stationära förhållanden mot grundvattennivåerna som uppmättes i fält 2013-11-05. Samtliga observationsrör lades in i modellen och de rör som hade mätts i fält jämfördes med motsvarande simulerade värdena (Tabell 4). Värdena jämfördes bland annat genom att differensen och det absoluta medelvärdet (AMF) beräknades,

$$AMF = \sum \frac{|h_{uppmätt} - h_{simulerad}|}{n} \quad (1)$$

där n är antalet observationsrör och h grundvattennivån för varje observationsrör. De parametrar som kalibrerades i modellen var främst hydraulisk konduktivitet men även strömningsmotståndet mellan Fysingen och grundvattenmagasinet. Motståndet som i Feflow även kallas *in-/out-transfer rate (flow)* kan räknas ut av konduktiviteten och tjockleken på det tätande lagret och motståndsvärdena tilldelades till en början både till ut- och inflöde i sjön (ekvation 2) (Feflow, 2013)

$$\Phi = \frac{K}{d} \quad (2)$$

där Φ är konduktansen hos sjöbotten, K är hydraulisk konduktivitet för det tätande lagret och d är tjocklek på det tätande lagret. Förutom att försöka minimera skillnaden mellan simulerade och uppmätta grundvattennivåer, studerades även gradienten mellan de olika rören. Detta för att få så korrekt lutning av grundvattennivåerna som möjligt. Skillnaden mellan grundvattennivån längs med sjön och sjöns nivå användes också för kalibreringen.

Modellen kalibrerades också vid transienta förhållanden med hjälp av data från en provpumpning genomförd av Norrvatten under fem dagar i juni år 2010. Medelvärdet för det utgående flödet från pumparna var 163 L/s vilket fördelades på två brunnar med vardera 81,5 L/s. I samband med den provpumpningen utfördes kontrollmätningar i ett par observationsrör

i närheten av vattenverket (R13 och Rb8801). Avsänkningen som erhöles i rören efter pumpförsöket jämfördes med den i Feflow simulerade avsänkningen.

Skillnaden i avsänkning mellan de uppmätta värdena och de simulerade värdena vid transienta förhållanden gav en indikation på huruvida korrekta värden på den hydrauliska konduktiviteten hade använts för grusåsen närmast provpumpningsplatsen. En för liten avsänkning i modellen kan visa att ett för högt värde på den hydrauliska konduktiviteten användes eller att isälvs materialet i modellen breder ut sig för mycket åt sidorna. En för stor avsänkning visar istället på att värdena på den hydrauliska konduktiviteten är för låga.

3.3.2 Simulering av infiltrations- och uttagsscenarioer

Norrvattens totala vattenbehov är 130 000 m³/d (~1500 L/s) där Märstas grundvattentäkt är en av flera som ska bidra till detta behov om reservvattentäkterna måste kopplas in. De scenarier som undersöktes i simuleringarna utformades för att ge ett betydande bidrag till det totala behovet som finns samt att få en bild över hur grundvattentäkten svarar på olika uttags- och infiltrations-scenarier. Det som undersöktes var följande:

- Scenario 1. Uttag av 100 L/s utan infiltration
- Scenario 2. Uttag och infiltration med 150 L/s.
- Scenario 3. Uttag och infiltration med 300 L/s.

Först simulerades ett uttag på 100 L/s under en månads tid utan infiltration för att se hur grundvattentäkten svarade på detta. Till detta användes brunnarna GP1 och GP2 och 50 L/s togs ut från vardera brunnen (Figur 8).

Därefter utfördes ett uttag av 150 L/s tillsammans med en lika stor infiltration. Samma brunnar som vid uttagsförsöket med 100 L/s användes, men denna gång pumpades de med 75 L/s vardera. Sprinklerinfiltration som går med ett flöde på 100 L/s bör lämpligen spridas över en yta på ungefär 5000 m² för att få en lämplig genomströmning i marken, utan att marken blir för mättad (Grundvattengruppen, 2012b). Infiltrationsytan som i det här fallet hade en yta på 6140 m² var belägen i det norra infiltrationsområdet drygt 1,1 km norr om Märsta vattenverk där uttagsbrunnarna är placerade. Området ansågs vara ett lämpligt infiltrationsområde vid Grundvattengruppens fältundersökning och som är tänkt att användas vid ett framtida infiltrationsförsök i fält. Platsen är gynnsam för infiltration då den är högt belägen och marken har goda infiltrationsegenskaper. Platsen är även lokaliserad så att de eventuellt störande effekterna som installationen av infiltrationsanläggningen skulle kunna innebära för markägare och omgivning är minimala (Figur 8).

Ett uttag på 300 L/s ur Märsta grundvattentäkt skulle innebära ett betydelsefullt bidrag (20 %) av Norrvattens totala behov. Detta uttag simulerades från tre brunnar, GP1, GP2 och GP4 som har en kapacitet på 80 L/s. Ytterligare en fjärde brunn finns (GP3), men då ingen information om brunnens djup fanns tillgänglig fördelades istället uttaget med 100 L/s på de tre övriga brunnarna i modellen. Då brunnarna ligger nära varandra och det enda som studeras är effekterna av uttaget på grundvattennivån i området bör resultatet bli detsamma som om fyra brunnar hade körts. Infiltrationen av 300 L/s delades upp på två olika infiltrationsytor med vardera 150 L/s, belägna söder och norr om uttagsplatsen. Det ena området är samma område som användes vid infiltration av totalt 150 L/s och det södra området är beläget ca 250 m sydväst om grundvattenverket och brunnarna (Figur 8). Det södra området har även det pekats

ut i fält som ett lämpligt område för konstgjord grundvattenbildning på grund av dess höga läge och genomsläppliga jordlager.



Figur 8. Infiltrationsytornas och uttagsbrunnarnas lägen (© Lantmäteriet).

I samband med infiltrationsförsöken studerades även utbytet i modellen mellan Fysingen och grundvattenmagasinet under tiden som scenarierna pågick. Detta gjordes för tre olika områden lokaliserade norr om uttaget, söder om uttaget och för den resterande delen av Fysingen för att kunna se eventuella lokala skillnader i flödet över randen och Fysingens kontakt med åsen (Figur 9).



Figur 9. Områden i vilka utbytet med Fysingen studerades; norr om uttaget, söder om uttaget och övriga Fysingen.

4 RESULTAT

De simulerade grundvattennivåerna jämfördes med de i fält uppmätta värdena. Då den norra delen av åsen har betydligt högre grundvattennivåer än de flackare södra områdena delas i presentationen några profiler upp för att tydliggöra skillnader i de flackare områdena som annars kan se ut som obetydliga.

4.1 UNDERLAGSGRUNDER

4.1.1 Fältundersökning

Under det andra mättillfället lodades samtliga grundvattenrör, se rör med röd ring i Figur 4. Då rör Rb8608- 110919E hade mätts relativt nyligen och ansågs som säkra utfördes inga nya mätningar på dessa rör. Mätningarna 2013-11-15 utfördes i samband med inmätningen av observationsrören och därför mättes inte heller de grundvattennivåerna. Mätningarna från 2013-11-05 användes vid kalibreringen (Tabell 3). Samtliga plushöjder, som är den höjd över havet som erhålls genom att jämföra röröverkantens höjd med en närliggande inmätt fixpunkt med känt läge över havet, anges i höjdsystemet RH2000. De äldre uppmätta plushöjderna erhöles dock till en börjar i RH00 varpå en faktor för Sigtuna kommun på +0,574 m användes för att omvandla dessa (via e-mail kontakt med K. Fredriksson).

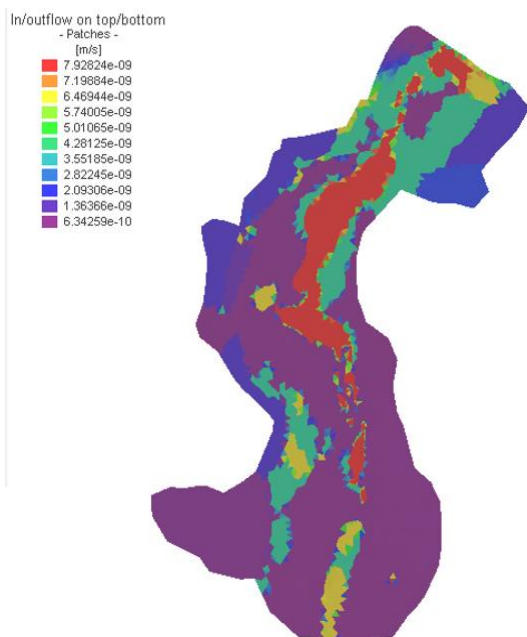
Tabell 3. Resultatet från fältmätningar av grundvattennivåer mätta från rörets överkant till grundvattenytan och inmätningar av grundvattenrörens övre kant vilket sedan räknades om till grundvattennivåer i meter över havet.

Rör	2013-11-05 [m]	2013-11-15 [m]	Inmätta plushöjder [m] 2013-11-15	Gamla plushöjder [m]
R10	0,96	0,918	Osäker	3,334
R12	1,51	1,45	3,814	3,847
R13	2,17	2,13	3,814	4,477
R14	2,43	2,36	4,694	4,695
Rb 8801	3,22	3,15	5,52	Fanns ingen
R19	7,74	7,68	10,044	10,101
B	2,16	2,25	4,474	Osäker
Rör 20	5,86	5,82	8,354	8,466
Rb 8608	6,67	Mättes inte		
Rb 8609	6,96	Mättes inte		
110919D	9,89	Mättes inte		
110919E	4,95	Mättes inte		

4.2 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL

4.2.1 Grundvattenbildning

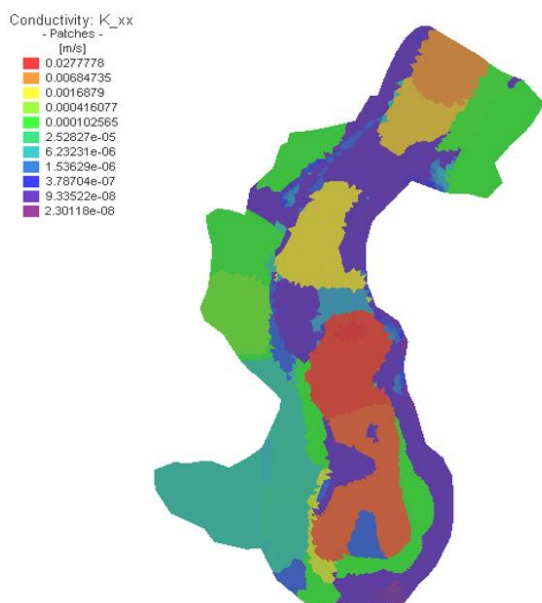
I ursprungsläget tilldelades modellen den uppskattade grundvattenbildningen på sammanlagt 44 L/s (~90 mm/år) för det översta jordlagret. Då modellen kalibrerades för stationära förhållanden visade det sig dock att värdet antagligen var överskattat då grundvattenytan, framför allt vid den västra avgränsningen med morän och bergsområden, fick värden ovanför markytan. Grundvattenbildningen sänktes därför i de områden som visade för höga grundvattennivåer vilket ledde till områdets totala grundvattenbildning istället blev 36,7 L/s (~75 mm/år) (Figur 10).



Figur 10. Grundvattenbildningen efter korrigering blev 36,7 L/s för hela området.

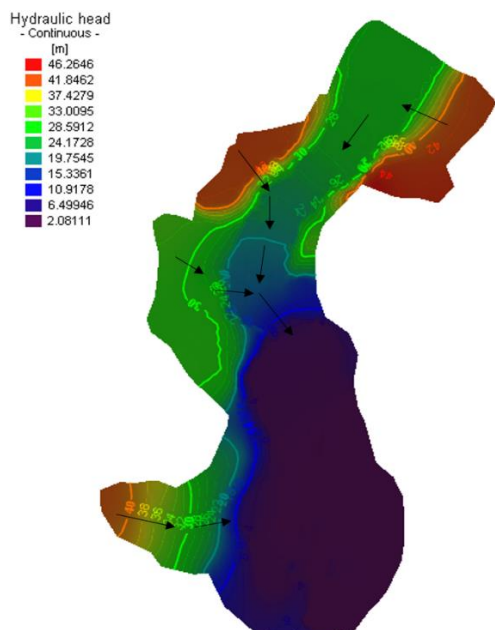
4.3 MATEMATISK HYDROGEOLOGISK MODELL

Grundvattennivåerna som kalibrerades fram är en medelväg mellan den stationära och transienta kalibreringen och utifrån detta valdes modellområdets slutgiltiga fördelning av hydraulisk konduktivitet (Figur 11). I Figur 11 visas även utformningen av stalpet, i mitten av åsryggen, för detta lager.



Figur 11. Den hydrauliska konduktiviteten för den slutkalibrerade modellen för det lager som i den generiska lagerföljden är isälvmaterial. I mitten av åsryggen ligger stalpet som dämmer upp grundvattenytan uppströms.

Grundvattenströmningarna i den färdigkalibrerade modellen är riktade från de topografiskt högre områdena i modellområdets yttre gränser mot de lägre områdena mot Fysingen (Figur 12).



Figur 12. Grundvattenströmningarnas riktning inom modellområdet.

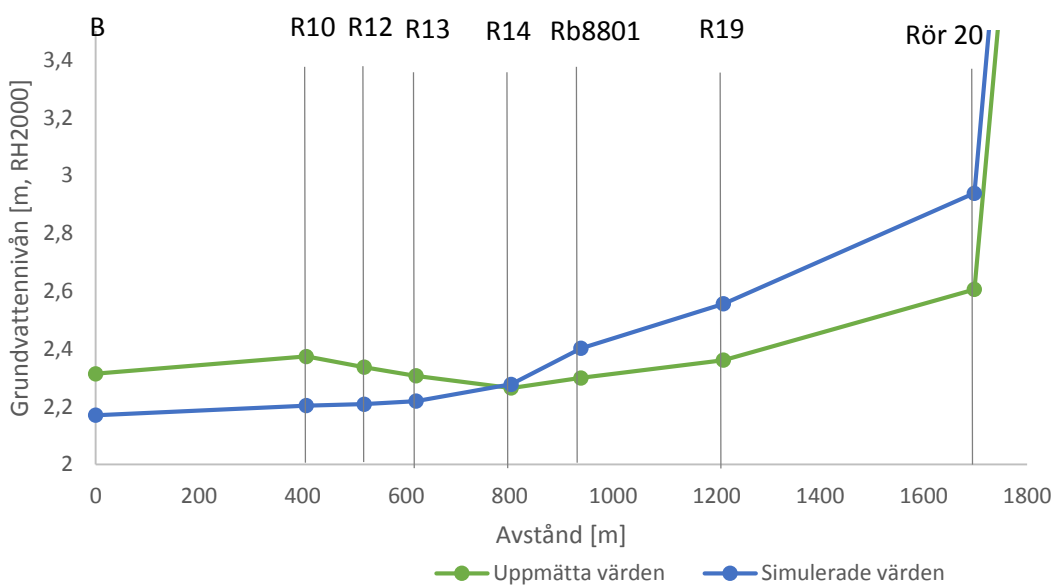
4.3.1 Kalibrering

I den slutliga kalibreringen för stationära förhållanden var det absoluta medelfelet på ca 36 cm (Tabell 4). De värden som gråmarkerats i tabellen är de nivåmätningar som inte utfördes under projektets fältundersökning utan erhöles från tidigare mätningar då dessa rör inte har funktionstestats på länge. Det absoluta medelfelet var störst i det gråmarkerade området, precis vid stalpet, men även precis söder om stalpet (Rör 20, R19 och Rb8801) där de simulerade grundvattennivåerna tenderar att bli högre än de uppmätta.

Tabell 4. I fält uppmätta värden jämförda med simulerade värden i Feflow.

Rör	Uppmätta [m]	Simulerat [m]	Differens [m]	Absolutfel [m]
110919D	27,421	27,675	0,254	0,254
Rb8608	27,410	27,619	0,207	0,207
110919E	27,406	27,444	0,038	0,038
Rb8609	27,394	27,183	-0,211	0,211
33020	18,814	18,868	0,054	0,054
B5	14,594	14,986	0,392	0,392
32544	18,294	17,341	-0,953	0,953
32421	17,754	16,620	-1,134	1,134
K13	17,074	17,544	0,470	0,470
Arlandabanan,460m	16,924	18,207	1,283	1,283
Arlandabanan,570m	16,514	17,076	0,562	0,562
Rör 20	2,606	3,004	0,398	0,398
R19	2,361	2,624	0,263	0,263
Rb8801	2,300	2,470	0,169	0,169
R14	2,265	2,333	0,068	0,068
R13	2,307	2,264	-0,043	0,043
R12	2,337	2,250	-0,087	0,087
R10	2,374	2,238	-0,136	0,136
B	2,340	2,189	-0,125	0,125
			Σ 0,077	Σ 0,358

De simulerade grundvattennivåerna längs åsen jämfördes mot de uppmätta för att kunna jämföra den hydrauliska gradienten (Figur 13). Rör B5 valdes att inte tas med då det ligger på sidan av de andra som annars ligger utmed en relativt rak linje. Norr om stalpet är de simulerade grundvattennivåerna för rör 32 544 och 32 421 för låga jämfört med de uppmätta värdena vilket ger en något avvikande gradient jämfört med den uppmätta. Den hydrauliska gradienten söder om stalpet följer i princip den uppmätta gradienten fram till Rb8801. Därefter viker de simulerade grundvattennivåerna av vilket resulterar i en lägre grundvattenyta än den uppmätta efter R14. Den simulerade hydrauliska gradienten uppvisar på en konstant, mot söder, nedåt lutande grundvattenyta. Enligt de uppmätta värdena finns det en liten förhöjning i grundvattennivåerna vid R10. Grundvattenytan vid R10 grundar sig dock på tidigare uppmätta inmätningar då den vid projektets inmätningstillfälle gav osäkra resultat på grund av dålig GPS kontakt och resultaten där är därför något osäkra.

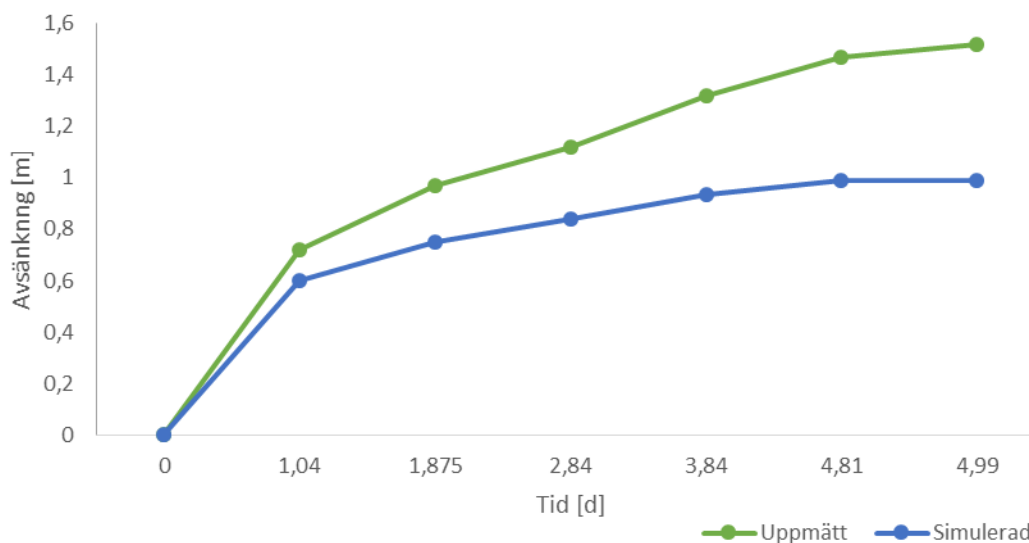


Figur 13. Jämförelse mellan den uppmätta och den simulerade grundvattennivåns lutning i tvärsnitt söder om stalpet. Rör 20 ligger närmast söder om stalpet och B är det sydligaste av de observationsrör som användes i kalibreringen.



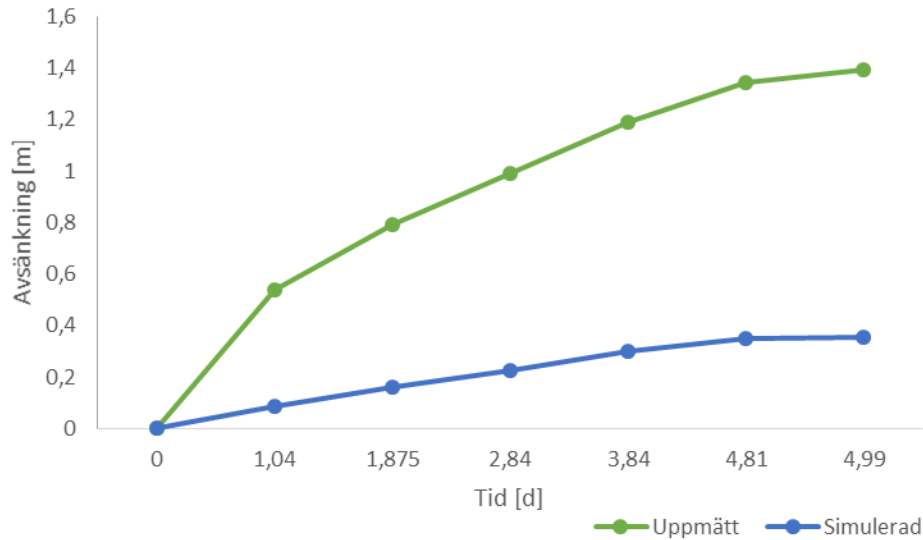
Figur 14. Grundvattennivåerna undersöktes i profil för modellområdet för att få en inblick i hur ytans lutning ser ut i genomskärning (den lila linjen).

Vid den transienta kalibreringen blev avsänkning för rör R13 lite drygt 65 % av den uppmätta avsänkning vid simuleringens slut (Figur 15). Detta resultat uppnåddes oavsett vilka två brunnar som användes.



Figur 15. Den simulerade avsänkning jämfört med den uppmätta avsänkning för observationsrör R13, från en fem dagars provpumpning.

Avsänkningen för det andra observationsröret, Rb8801, blev cirka 25 % av den uppmätta avsänkningen (Figur 16).

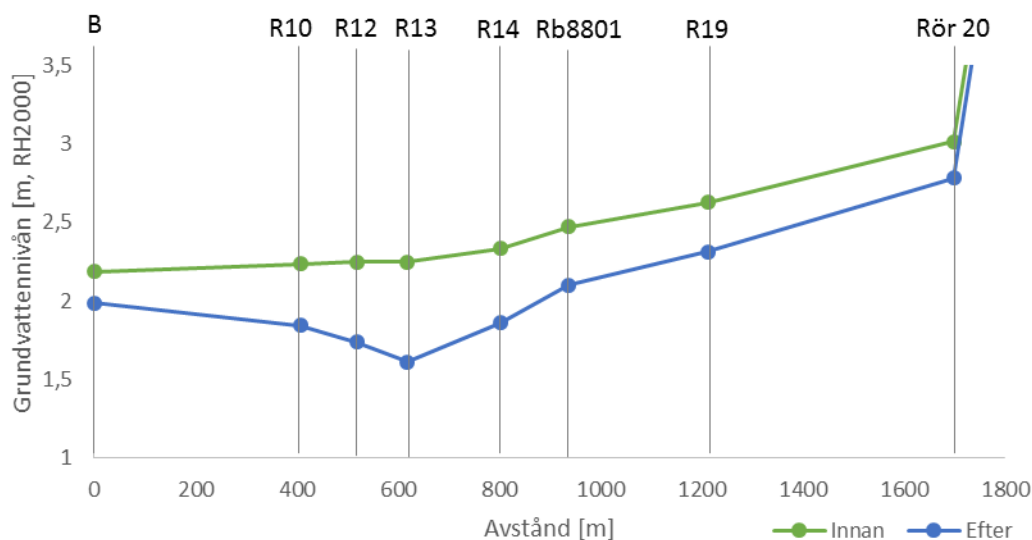


Figur 16. Den simulerade avsänkningen jämfört med den uppmätta avsänkningen för observationsrör Rb8801, från en fem dagars provpumpning.

4.3.1 Simulering av infiltrations- och uttagsscenarioer

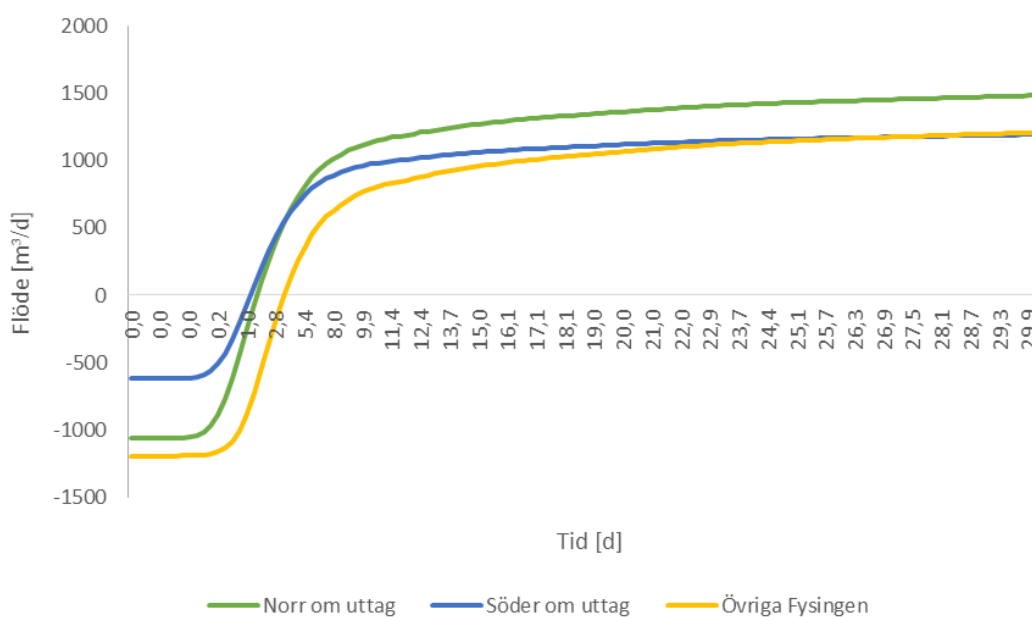
4.3.1.1 Scenario 1: Uttag av 100L/s

Simuleringen av ett uttag av 100 L/s under en månads tid från brunnarna GP1 och GP2 utan infiltration visar att uttaget i princip inte påverkar grundvattennivåerna alls i observationsrören norr om stalpet vid vilka avsänkningen ligger runt noll (Bilaga C). Området söder om stalpet, från rör 20 och ner till observationsrör B, påverkades däremot tydligt. Den största avsänkningen var vid observationsrör R13, närmast uttagsbrunnarna, där grundvattenytan sjönk med 64 cm (Figur 17). Vid simuleringen kunde ingen avsänkning observeras för observationsröret ute på ön Stora Kyngan i Fysingen och inte heller för de observationsrör närmast den södra områdesavgränsningen vilket visar på att uttaget inte verkar ha påverkat grundvattenytan där.



Figur 17. Diagrammet visar skillnaden mellan grundvattennivåerna före och efter ett uttag vid scenario 1 (100 L/s). Även här påverkade grundvattennivåerna endast söder om stalpet.

Under simuleringen mättes in- och utflödesvariationer från olika områden i Fysingen under pumpningen (Figur 18). Resultatet visade att det sker ett utflöde mot sjön fram till ungefär en dag efter pumpningens start då grundvattennivåerna närmast sjön sjunkit till lägre nivåer än sjön. Detta resulterar i att flödet ändrar riktning och vatten från Fysingen infiltrerar in mot grundvattentäkten istället. Diagrammet visar också att ut- och inflödet är något större norr om uttaget än söder om uttaget. I början av uttagsperioden sker ett större utflöde av grundvatten från området som kallas övriga Fysingen än för de områden som ligger närmast uttagsplatsen. Eftersom grundvattennivåerna vid den övriga delen av Fysingen inte påverkas lika mycket av uttaget som för norr och söder om uttagsplatsen är infiltrationen av sjövatten där lika stor eller något mindre mot slutet av uttagsperioden.

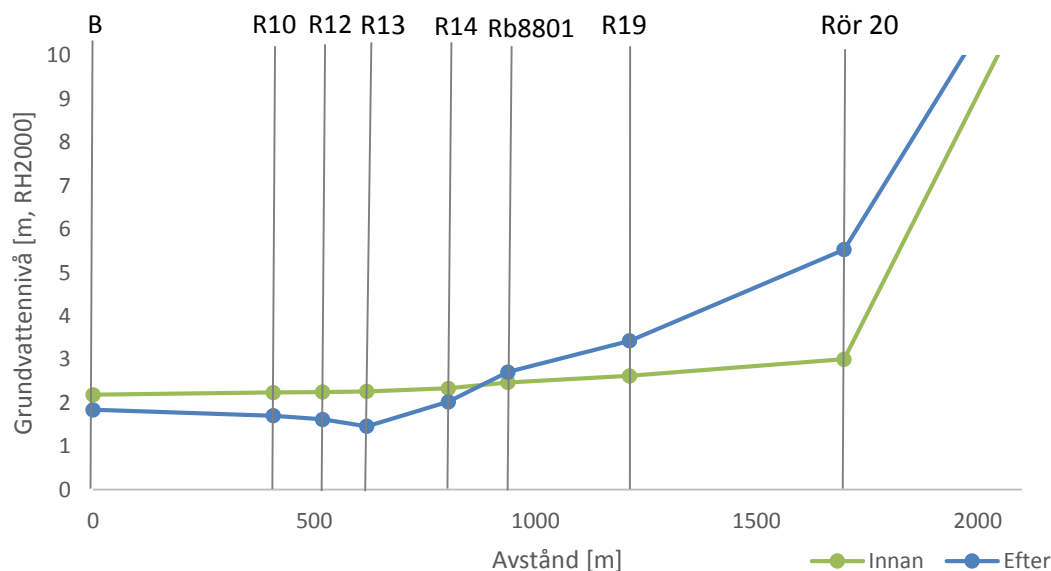


Figur 18. Simulerat vattenutbyte mellan modell och sjön Fysingen vid scenario 1. Negativt flöde visar flöde ut ur modellen till sjön och positivt in i modellen, från sjön.

Efter ungefär fem dagars uttag avtar ökningen och går mot konstanta värden på infiltration från Fysingen in till åsen vilka efter en månad hamnar på ungefär 1190 m³/d för övriga Fysingen och 1480 m³/d respektive 1200 m³/d norr och söder om uttaget.

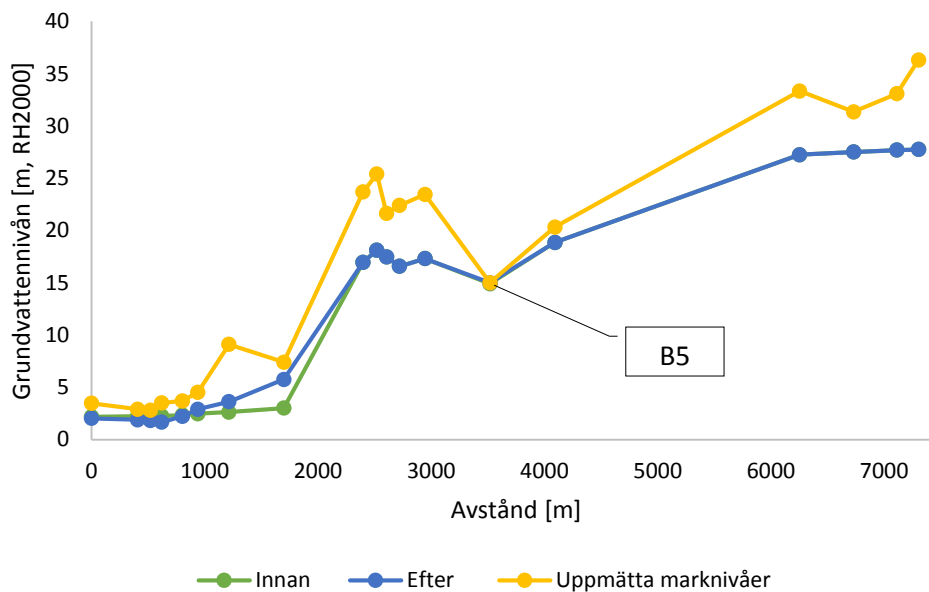
4.3.1.2 Scenario 2: Uttag av 150 L/s med infiltration av 150 L/s

Uttag och infiltration av 150 L/s hade störst påverkan på grundvattennivåerna närmast infiltrationsområdet. Vid det norra infiltrationsområdet skedde en ökning av grundvattennivån från 3,2 m till 8,0 m. Trots den stora ökningen av grundvattennivån bör det inte vara någon risk för ytavrinning då marknivåerna ligger på ca 20 m. Vid det södra infiltrationsområdet sker en mindre ökning av grundvattennivån från 1,97 m till 2,19 m vilket inte heller visar på någon risk för ytavrinning. Observationsrör rör 20, som ligger drygt 100 m sydost om det norra infiltrationsområdet, uppvisade den största skillnaden i grundvattennivåer av observationsrören med en höjning med 2,73 m efter en månads infiltration och uttag. Den största avsänkningen uppstod närmast uttagsplatsen vid R13 där avsänkningen var 60 cm (Figur 19).



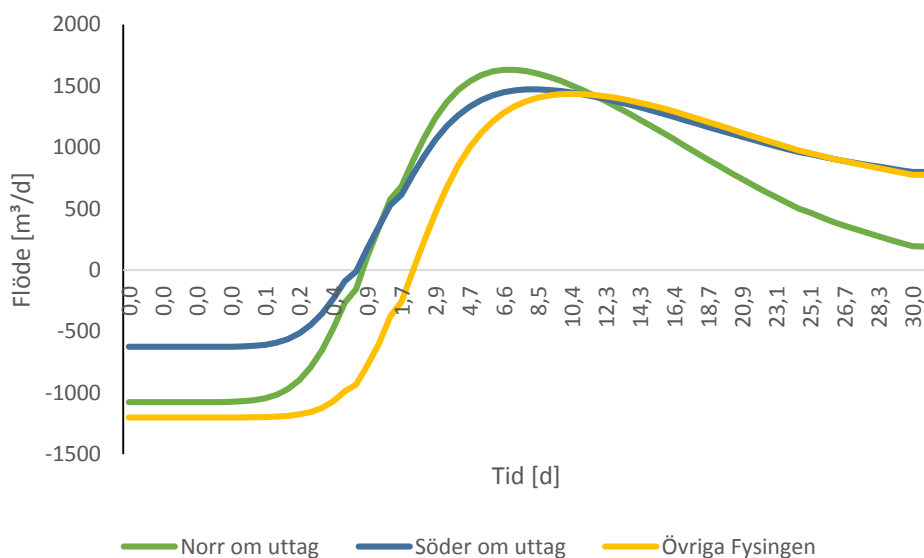
Figur 19. Inverkan av infiltration och uttag med 150 L/s på grundvattennivån. Från och med observationsrör "Arlandabanan, 570 m SSO" och norrut observerades ingen markant skillnad varför dessa värden inte visas i diagrammet.

Infiltrationen och uttaget hade även i det här fallet ingen nämnvärd påverkan på grundvattennivån norr om stalpet. Vid rör 20 höjdes grundvattennivån markant till 1,65 m under markytan (Figur 20).



Figur 20. Grundvattennivåns läge innan och efter uttag och infiltration med 150 L/s i en månad jämfört med i fält uppmätta nivåer för markytan.

Under de första dagarna av simuleringen sker ett flöde ut ur modellen, från åsen till Fysingen. Då grundvattennivåerna närmast sjön sjunker till nivåer lägre än Fysingens skapas en motsatt riktad gradient vilket gör att sjövattnen infiltrerar in i åsen istället. Utbytet mellan Fysingen och grundvattentäkten är störst precis norr om uttaget (Figur 21). Infiltrationen av sjövattnen till åsen sker tidigare vid uttaget än för resten av Fysingen. Inflödet av vatten från Fysingen får ett maximalt värde på 1630 m³/d, 1470 m³/d och 1430 m³/d för norr om uttaget, söder om uttaget och Södra Fysingen, efter ungefär en vecka då flödet börjar avta. Detta sker något tidigare för områdena i Fysingen närmast uttaget än för resten av Fysingen.

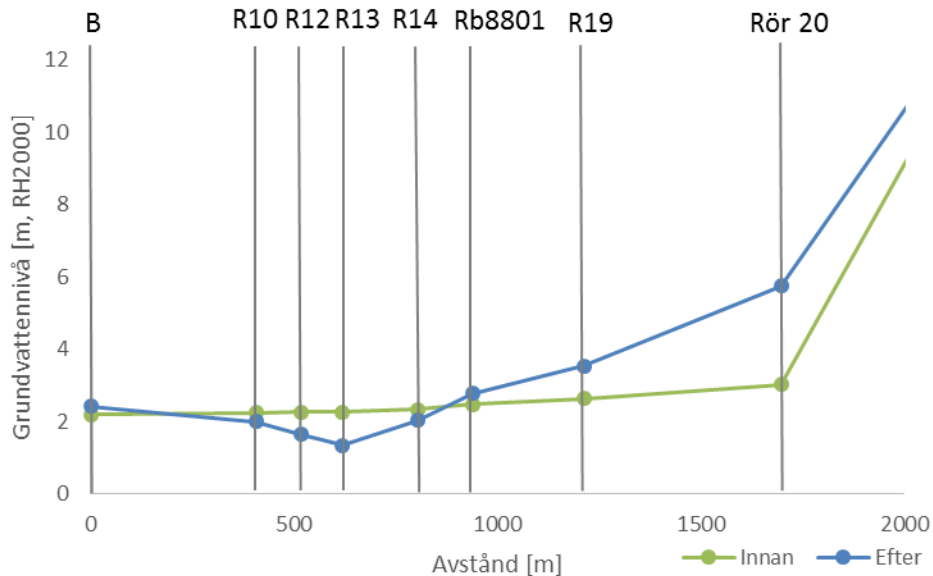


Figur 21. Flödets riktning i Fysingen för norr respektive söder om uttagsplatsen.

4.3.1.3 Scenario 3: Uttag av 300 L/s med infiltration av 300 L/s

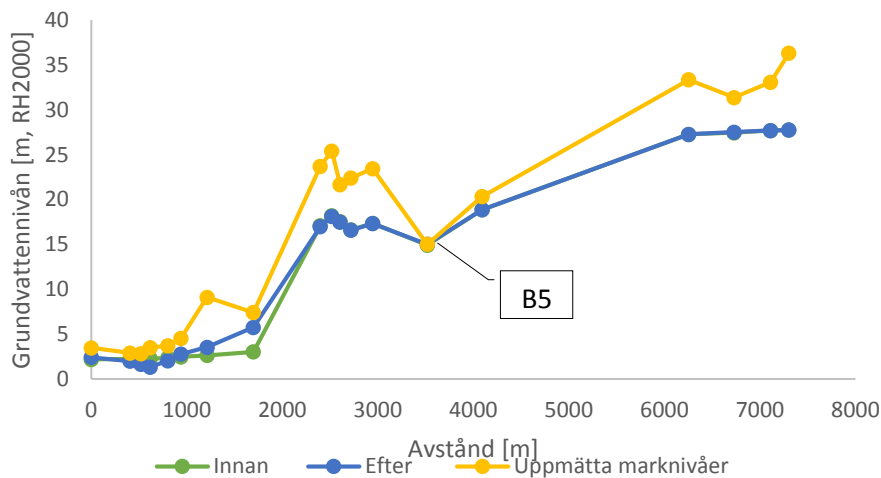
Då infiltration och uttag ökades till 300 L/s erhöles liknande resultat som vid 150 L/s. Det observationsrör som visade på den högsta höjningen av grundvattenytan var rör 20 med en höjning på 2,65 m och den maximala avsänkningen observerades vid rör R13 med en sänkning på 96 cm efter en månads tid (Figur 22).

Grundvattenhöjningen vid den norra infiltrationsytan var 4,8 m, från simulerade värden på 3,20 till ca 8 m. För det södra infiltrationsområdet blev ökningen mindre, ungefär 0,6 m från 2,2 m till 2,8 m.



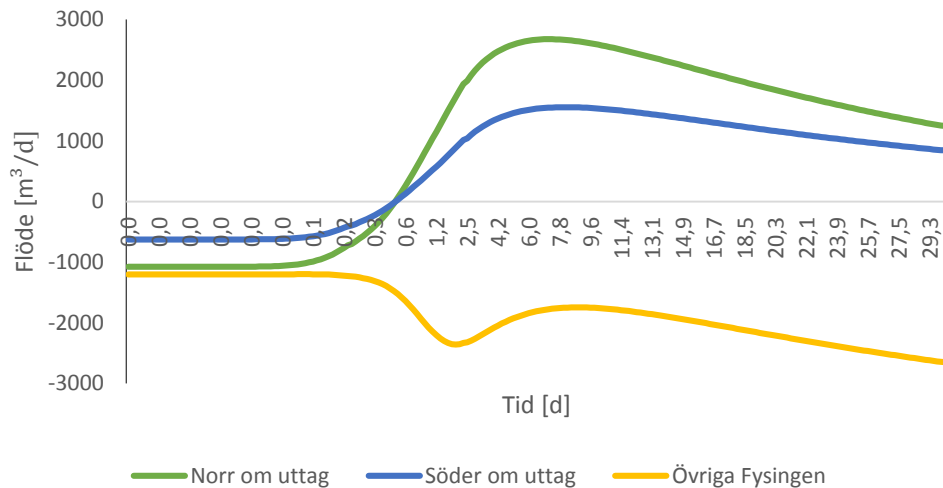
Figur 22. Grundvattennivån före och efter infiltration och uttaget med 300 L/s efter en månad för den södra delen av grundvattenmagasinet.

Ungefär samma resultat erhöles här som infiltration och uttag av 150 L/s i en månads tid. En jämförelse mellan grundvattennivåerna före och efter simuleringen visade att den största risken för ytavrinning fanns vid B5 (Figur 23).



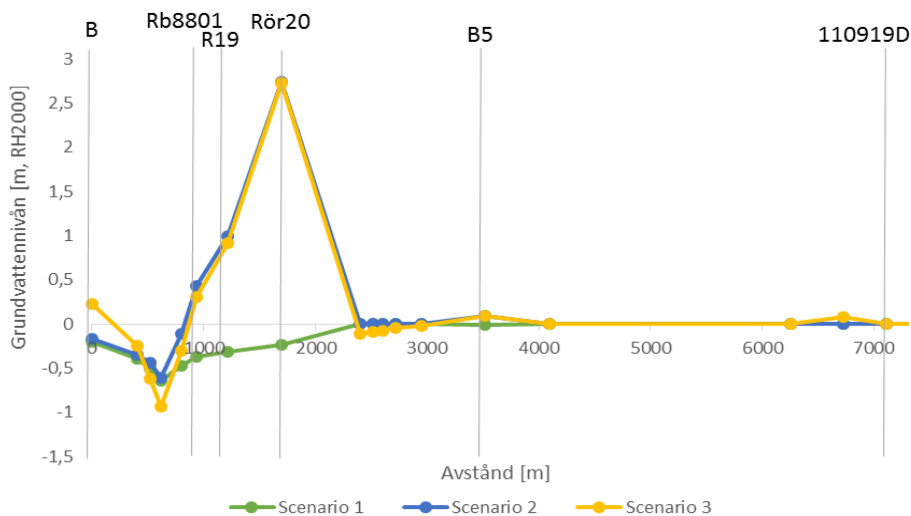
Figur 23. Grundvattenytans nivå före och efter uttag och infiltration med 300 L/s jämfört med uppmätta marknivåer.

Efter sju dagar av pumpning uppnåddes det största inflödet från Fysingen på 2670 m³/d och ungefär en dag senare var det största inflödet precis söder om uttaget 1550 m³/d (Figur 24). Längre söderut i Fysingen skedde inget inflöde till modellen från sjön utan istället ökade utflödet till sjön i dessa områden.



Figur 24. Variationer i ut- och inflöde för scenario 3, uttag och infiltration av 300 L/s under en månads tid, från olika delar av Fysingen.

Grundvattennivåernas förändring blev ej markant olika vid de två olika infiltrations-scenarierna (Figur 25). Höjningen av grundvattenytan vid rör 20 beräknades till i princip samma värden medan avsänkning blev ca 40 cm större vid pumparna för uttaget av 300 L/s. Avsänkning sträcker sig för scenario 1 enda från söder om stalpet och ner till Fysingens strand vid rör B. Störst blev avsänkning precis vid uttagsbrunnarna. För scenario 1 blev den 64 cm, för scenario 2 60 cm och för scenario 3 blev avsänkning som mest 96 cm. Vid båda infiltrationsförsöken breder avsänkning ut sig till strax innan observationsrör Rb8801 och Ströms gård där man istället får en ökning av grundvattennivåerna.



Figur 25. Jämförelse mellan avsänkningar och höjningar av grundvattenytan för de olika scenarierna efter en månads simuleringstid.

5 DISKUSSION

Resultatet från simuleringen visade att ett uttag av 100 L/s under en månads tid, utan infiltration, ger en mer utbredd avsänkning av grundvattenytan än då ett uttag kombineras med en lika stor infiltration. Avsänkningen av grundvattenytan efter simulering av samtliga scenarier visade inte några tecken på risk för mobilisering av djupare grundvatten som skulle kunna påverka grundvattenkvaliteten i magasinet. Höjningen av grundvattenytan till följd av infiltrationen vid scenario 2 och 3 visade inte på några grundvattennivåer ovanför markytan. Simuleringen visade dock på grundvattennivåer väldigt nära markytan vid observationsrör B5 varför risken för ytavrinning är störst i detta område.

5.1 FÄLTUNDERSÖKNING

För att säkerställa att de plushöjder som fanns för observationsrören stämde gjordes ytterligare mätningar med hjälp av GPS. Eftersom den är beroende av satellitkontakt blev mätningarna för observationsrör B och R10, belägna i områden med tät växtlighet, väldigt osäkra. Dessa två inmättes på nytt först efter att modellen var färdigkalibrerad och scenarioanalysen gjord. Därför användes de tidigare uppmätta värdena plushöjderna för R10 och B istället vilket skapade en viss felaktighet för grundvattennivåer och den hydrauliska gradienten i modellområdet närmast sjön. Enligt de mätningar som modellen grundades på var de lägsta grundvattennivåerna vid observationsrör R14, en bit söder om Ströms gård, och vid observationsrör B, i närheten av Fysingens nordvästra strand. Efter den nya inmätningen visade det sig att plushöjden för observationsrör B stämde överens med tidigare inmätningen som även används i kalibreringen. Resultatet efter den andra inmätningen för R10 visade på ett väldigt avvikande värde både för plushöjden och den omräknade grundvattennivån i röret. Den verkliga grundvattennivån är därför fortfarande inte säker där varför ytterligare mätningar bör göras för att säkerställa nivån vid R10. Den något lägre grundvattennivån vid R14 kan bero på en ökad kontakt på grund av exempelvis att åsmaterialet breder ut sig mot sjön just där.

5.2 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL

Berggrunden utgör det understa lagret och skapades med hjälp av information om djup ner till berggrunden från befintliga borrhningar samt höjder för berg i dagen från jordartskartan kombinerat med höjddata. Eftersom det endast fanns ett fåtal punkter med känd bergyta under jordlager interpolerades resten av bergsnivåerna i ArcMap med hjälp av interpolationsmetoden IDW (Inverse Distance Weighted). Detta gör att det finns en osäkerhet då interpolationen jämnar ut bergytans verkliga topografi som i sin tur kan påverka grundvattennivåernas läge i grusåsen. Fler och säkrare borrhningar skulle ge en mer detaljerad bättre återskapad bergsyta vilket i sin tur skulle kunna minimera osäkerheten på dess påverkan på simuleringsresultatet.

Jordlagerföljden och antalet lager skapades efter hur det generellt kan se ut i svensk mark som utgörs av isälvsmaterial. Detta gjordes för att få ett utgångsläge för antalet lager som modellen skulle skapas av. Eftersom det endast fanns information om jordlagerföljder precis intill eller i isälvs materialet ansågs detta som en bättre utgångspunkt än att basera modelluppbygganden på informationen från de fåtalet säkra borrhningarna. Tjockleken på lagren ansattes bland annat med hjälp av information om jordlagerföljder från borrhningar. En del av borrhningarna gav endast information om de grundare jordlagren och ingen information om var borren stötte på berg. Detta ledde till att djupet till bergytan och jordlagerföljden fick

uppskattas även här och borrningarna fick istället fungera som indikationer för både djupet till bergsytan, åsen utbredning och jordlagerföljden vilket även det bidrar till en viss osäkerhet i dessa områden (Bilaga B).

5.2.1 Grundvattenbildning

Grundvattenbildningen togs fram utifrån vattenbalansberäkningar där värden på årsmedelnederbörd och årsmedelavdunstning användes tillsammans med den hydrauliska konduktiviteten för respektive jordart. Även om nederbörden varierar med tiden så kan ett medelvärde i den här undersökningen anses motiverat att använda då propumpningen, som modellen kalibrerats mot, utfördes under en så pass kort tid att korta variationer i nederbörden inte skulle ha påverkat resultatet nämnvärt. I det här projektet har intresset dessutom varit att undersöka den totala avsänkningen efter en månads tid och inte variationer över tiden vilket även det motiverar användandet av ett medelvärde. Osäkerheten för grundvattenbildningen är störst vid högområdena väster om E4:an. Troligtvis hindrar de hårdgjorda ytorna där en del av grundvattenbildningen från de västra delarna att nå grusåsen som mestadels ligger vid grundvattendelarens östra gräns. Därför sänktes den totala grundvattenbildningen för modellområdet från de ursprungliga uppskattade medelvärdet till 36,7 L/s. Hur mycket det faktiskt påverkar är oklart och har inte studerats vidare i det här examensarbetet.

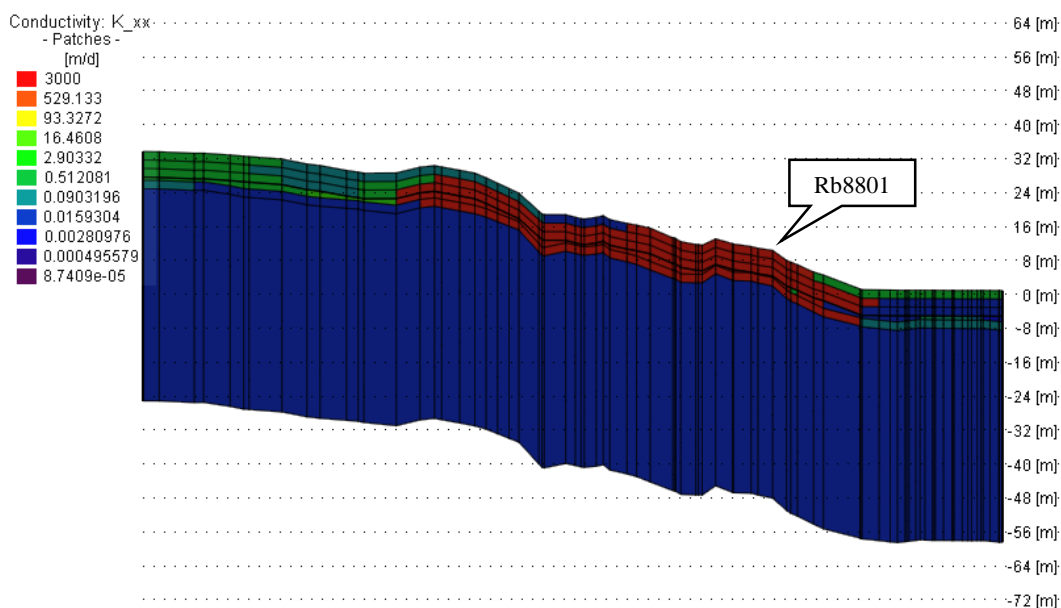
5.3 MATEMATISK HYDROGEOLOGISK MODELL

Vid kalibreringen av modellen användes egna mätningar som även jämfördes med tidigare mätningar från år 2012 i samma observationsrör för att försäkra sig om att nivåerna stämde. Rören som mättes i fält valdes ut baserat på att de ansågs funktionsdugliga, och alltså inte täppts igen, samt för att täcka de viktigaste områdena av åsen och samtidigt få en så stor spridning över området som möjligt. Precis vid stalpet, norr om de flackare områdena runt Fysingen, fanns endast värden uppmätta från år 2005. Dessa värden är gråmarkerade i Tabell 4 och användes i kalibreringen för att ge en fingervisning om hur höga grundvattennivåerna kan tänkas vara i det området. Detta skall dock ha i åtanke vid analys av resultatet i dessa områden då grundvattennivåerna kan vara antingen under- eller överskattade runt stalpet. Området ligger dock så pass långt från uttagsbrunnarna att grundvattenytan där troligtvis endast påverkas marginellt av ett utflöde vid uttagsplatsen vilket även resultaten från simuleringen visade.

Vid kalibreringen av stationära förhållanden visade det sig att i vissa områden var det svårt att återskapa de verkliga förhållandena. Precis nedanför stalpet (observationsrör Rör20 och R19) tenderade de simulerade grundvattennivåerna att blir högre än de uppmätta nivåerna. Olika potentiella lösningar på detta problem prövades. Att det finns ett stalp som dämmer upp grundvattennivåerna i den norra delen av området är högst troligt och stärks av den branta hydrauliska gradienten för de uppmätta värdena i detta område. Förekomsten av ett stalp bekräftas även från tidigare undersökningar i området (Orrje & Co, 1952). Eftersom det finns isälvmaterial även i de norra delarna krävs det att antingen en bergtröskel eller ett område med väsentligt lägre hydrauliska konduktivitet, t ex lera, dämmer upp nivåerna där. Stalpet återskapades genom att ett område, mitt i åsen, tilldelades ett lägre värde på den hydrauliska konduktiviteten än isälvsmaterialet uppströms och nedströms vilket gav en dämmande effekt. Då det inte finns några uppgifter om jordlagerföljder vid stalpet har dess mäktighet och hydrauliska konduktivitet uppskattats baserat på grundvattennivåer och den hydrauliska gradienten uppströms och nedströms stalpet.

De för höga grundvattennivåerna precis söder om stalpet har även bidragit till att den låga hydrauliska gradienten, vid det flacka området från söder om stalpet och ner till Fysingens nordvästra strand, inte heller lyckats återskapats helt korrekt. För att få ner grundvattennivåerna ökades isälvs materialets K-värde till $2,3 \cdot 10^{-2}$ m/s (2000 m/d) precis efter stalpet vilket sänkte grundvattennivån där något. Med detta K-värde för hela den södra delen av åsen skulle dock grundvattennivåerna närmast sjön sänkts för mycket varför ett något lägre K-värde ansattes just där. Några potentiella anledningar till de höga, simulerade grundvattennivåerna precis söder om stalpet kan vara en för hög grundvattenbildning eller fel utformning av stalpet som till exempel ett för högt K-värde vilket även påverkar nivåerna nedströms. En ändring av dessa förhållanden påverkar dock grundvattennivåerna i andra områden av modellen vilka i sin tur skulle behöva justeras. Trots dessa avvikelser ansågs modellen återspegla de riktiga förhållandena tillräckligt bra för att användas vid simuleringen av scenarierna.

Kalibreringen av transienta förhållanden, där avsänkningen blev mindre än den som uppmätts i fält, indikerar tvärt emot den stationära kalibreringen, att värdena på den hydrauliska konduktiviteten närmast uttagsbrunnarna är för hög. Att avsänkningen för rör Rb8801 skiljde sig betydligt mer från de uppmätta värdena än vad R13 gjorde tyder på att åsen inte breder ut sig åt sidorna lika mycket i just det området (Figur 26). För att få en brantare avsänkning i modellen behöver antingen K-värdet för isälvs materialet sänkas eller åsens kontakt med sjön minskas i det området. Grundvattennivåmätningarna i fält tyder på att det finns en lokal sänka i grundvattenytan vid rör R14 vilket skulle kunna bero på en större kontakt med Fysingen i just det området. Detta skulle kunna vara en bidragande faktor till de låga grundvattennivåerna precis söder om stalpet. För att försöka återskapa detta ökades den hydrauliska kontakten med sjön jämfört med i övriga delarna av sjön för att se om detta kunde återskapa uppmätta värdena. Detta hade dock ingen effekt på de för höga värdena vid Rör 20 och R19 vilket troligtvis beror på en instabilitet i modellen och detta scenario bör därför utredas vidare vid framtida undersökningar.



Figur 26. Profilbild, i väst- östlig riktning, av den hydrauliska konduktiviteten i modellområdet vid observationsrör Rb8801.

5.3.1 Simulering av infiltrations- och uttagsscenarioer

5.3.1.1 Uttag av 100 L/s, utan infiltration

Ett uttag, utan infiltration, påverkar området runt brunnarna genom att grundvattennivåerna sänks av. Om avsänkningen blir alltför stor finns risk för att pumparna torrläggs. Vid simuleringen av en månads uttag av 100 L/s erhöles dock endast en avsänkning på som mest 63 cm. Detta tyder på att det inte finns någon risk för att grundvattennivån sänks så mycket att den kommer i närheten av pumparna då dessa ligger ca 10 m under den ostörda grundvattenytan. Även om avsänkningen i verkligheten blir större, vilket är troligt med avseende på resultatet från den transienta kalibreringen bör det fortfarande inte vara någon risk för att detta skall ske eftersom Norrvattens provpumpning med 163 L/s under en vecka gav en avsänkning på som mest 1,5 m närmast brunnarna.

Allt för låga grundvattennivåer på grund av ett kraftigt eller långvarigt uttag kan orsaka en ökad infiltration från sjön vilket kan påverka grundvattnets kvalitet negativt i form av en ökad halt organiskt material. Vid slutet av simuleringen (efter en månads tid) var flödet från Fysingen och in mot åsen större än den naturliga grundvattenbildningen för hela området. Det vatten som infiltrerar in från Fysingen kan alltså komma att ha en betydande påverkan på grundvattenkvaliteten i åsen. Tidigare inkopplingar av vattentäkten visar dessutom att vattnets kloridhalt och hårdhet ökar vid ett längre uttag av mindre än 100 L/s då grundvatten från djupare delar av åsen pumpas upp. Även om det inte finns några exakta uppgifter på hur stor avsänkning som krävs för att bidraget från de djupare delarna av grundvattenmagasinet ska bli betydande för vattenkvaliteten bör den maximala avsänkningen vid simuleringen på endast 60 cm, från 2,5 m till 1,6 m, inte innebära någon risk för mobilisering av djupt grundvatten då isälvs materialet på vissa ställen uppgår till runt 20 m tjocklek. Resultatet från den transienta kalibreringen av modellen, där den simulerade avsänkningen blev betydligt lägre än den i fält uppmätta, visar dock att avsänkningen även vid simuleringen av scenarierna troligtvis är

underskattad. På grund av detta är det inte lämpligt att ta ut 100 L/s under en så pass lång tid som en månad utan konstgjord grundvattenbildning med infiltration.

5.3.1.2 Uttag av 150 L/s med infiltration av 150 L/s

Ett uttag av 150 L/s skulle motsvara en tiondel av det totala behovet som Norrvatten har. Detta är ett något mindre uttag än vad som skulle behövas för att ge ett betydande bidrag till det totala vattenproduktionsbehovet och är dessutom mindre än den maximala uttagskapaciteten för Märsta vattentäkt på 280 L/s. Uttaget med infiltration skulle dock kunna vara bättre ur vattenkvalitetssynpunkt då risken för större avsänkningar är mindre. Då ett lika stort flöde skulle användas för infiltrationen skulle detta även innebära ett mindre uttag av infiltrationsvatten från Fysingen och alltså en något mindre påfrestning på sjön.

Av de undersökta grundvattenrören påverkades rör 20 mest vid detta scenario. Röret ligger, jämfört med de andra undersökta rören, närmast söderut efter det nordligaste infiltrationsområdet vilket gav en höjning av grundvattennivån på 2,7 m, från simulerade grundvattennivåer på ungefär 3 m till 5,7 m. Trots den markanta höjningen av grundvattenytan visar resultatet inte på någon risk för ytavrinning då markytan där har ett höjdläge på 7,4 meter över havet. Områden som däremot ligger i riskzonen för ytavrinning är området runt rör B5 där grundvattennivåerna ligger mycket nära markytan vilket kan förklaras av det utströmningsområde som enligt den hydrogeologiska kartan ligger strax nordöst om B5. Vid ett framtida infiltrationsförsök bör därför detta område undersökas under försökets gång så att ingen betydlig ytavrinning sker.

Liksom vid uttaget av 100 L/s utan infiltration kommer det att ske ett inflöde av sjövattnet från Fysingen. Vid infiltration motverkas inflödet från sjön efter en tid då det infiltrerade vattnet hunnit nå även de södra delarna av åsen vilket gör att inflödet från sjön går mot (Figur 21 och Figur 24). Eftersom man tillför lika mycket konstgjort grundvattenbildning som man tar ut går systemet, efter en viss tid, mot samma jämvikt som rådde innan infiltrationsförsöket.

Avsänkningen blev, liksom vid försöket med 100 L/s, som störst 60 cm, vid pumparna och observationsrör R13. Däremot var avsänkningen, tack var infiltrationen, mindre i områdena lite längre bort från uttagsområdet (43 cm istället för 51 cm i R12, röret precis söder om R13 och 11 cm avsänkningen istället för 47 cm avsänkning vid R14, norr om R13) och den brer dessutom inte ut sig över lika stort område som 100 L/s utan infiltration. Avsänkningen borde, enligt de simulerade nivåerna, inte innebära någon betydande risk för en försämrad vattenkvalitet med avseende på för höga kloridhalter och ökad hårdhet för grundvattnet. Detta grundas på att isälvs materialets tjocklek generellt är så pass stor att en avsänkning av grundvattenytan på 60 cm inte kommer att orsaka en mobilisering av djupare grundvatten tillräckligt för att ha en betydande påverkan på vattenkvaliteten. Detta bör dock kontrolleras vid ett framtida infiltrationsförsök för att säkerställa att kloridhalterna inte överstiger smakgränsen 300 mg/L (WSP, 2004).

5.3.1.3 Uttag av 300 L/s med infiltration av 300 L/s

Detta scenario skulle innebära ungefär en femtedel av Norrvattens totala uttagsbehov vilket skulle vara ett betydande bidrag. Avsänkningen blev som mest ca 90 cm, direkt vid uttagsbrunnarna. Precis som vid scenario 2 märktes att infiltrationen minskade avsänkningstrattens utbredning runt uttagsbrunnarna. Risken för ytavrinning på grund av

ökade grundvattennivåer verkar inte bli högre jämfört med scenario 2 trots att uttaget och infiltrationen ökades.

Baserat på tidigare undersökningar, genom bland annat provpumpningar och vattenkvalitetsmätningar som gjordes av Orrje & Co under 50-talet och början av 60-talet, innebär ett uttag av 300 L/s utan infiltration en stor risk för mobilisering av vatten med hög kloridhalt som finns i de djupare delarna av grundvattenmagasinet. Detta skulle snabbt försämra grundvattnets kvalitet med avseende på hårdhet och kloridhalt. Konstgjord grundvattenbildning genom infiltration skulle motverka en sådan mobilisering och är därför nödvändig vid ett längre uttag av den storleken.

Inflödet av sjövatten från Fysingen i området norr om uttaget vart större vid scenario 3 jämfört med scenario 2 vilket beror på en större avsänkning vid scenario 3 vilket resulterar i en lägre grundvattenyta jämfört med Fysingen som leder till det större inflödet av sjövatten. Söder om uttaget skedde ingen större skillnad i in- och utflöde till Fysingen vilket troligtvis beror på att det norra området i Fysingen har kontakt med grundvattenmagasinet där avsänkningen är som störst. Det är även vid det norra område som skillnaden i grundvattennivåer mellan scenario 2 och 3 är tydligast. Det är även vid det norra området som skillnaden i avsänkning mellan de två scenarierna är som störst. Detta beror troligtvis på att två infiltrationsområden användes vid scenario 3, ett söder om uttagsplatsen och ett norr om uttagsplatsen. Infiltrationen från det södra området motverkar en avsänkning där varför det knappt blir någon skillnad i avsänkning för scenario 2 och 3 söder om uttagsbrunnarna. Infiltrationen från det norra infiltrationsområdet sker med samma flöde vid båda scenarierna men det ökade uttaget gör att avsänkningen blir något större norr om uttagsbrunnarna vid scenario 3 vilket även bidrar till det ett större inflöde av sjövatten där.

5.4 VIDARE UNDERSÖKNINGAR

5.4.1 Fältundersökningar

Eftersom uppbygganden och kalibreringen av modellen till största del har utförts med hjälp av data från borrhningar och uppmätta grundvattennivåer i området skulle modellens osäkerhet minska om fler undersökningar gjordes i området. Viktig information skulle kunna inhämtas genom att driva ner nya observationsrör i strategiskt valda punkter. Detta skulle ge en utökad bild över isälvs materialets djup och utbredning samt om grundvattenytans läge i dessa punkter. Områden som borde prioriteras för detta är runt Fysingens utlopp och ute i Fysingen för att få en uppfattning om hur långt ut i sjön åsen breder ut sig. De befintliga observationsrören bör även funktionstestas och rensas vid behov innan de används. Några av de utsatta grundvattenrören gick inte att hitta inte vid fältundersökningen, bland annat i viktiga områden i områdets södra del, vid Fysingens strandkant. Dessa bör om möjligt lokaliseras eller ersättas av nya rör.

5.4.2 Kalibrering

Det kan finnas många anledningar till att för höga grundvattennivåer simulerades i delar av modellområdet och många olika sätt att lösa detta problem. Ett scenario att kalibrera emot skulle vara att sänka den uppskattade grundvattenbildningen över hela området med en viss procentandel, till exempel ner till 75 %. Detta skulle sänka grundvattennivåerna i hela modellområdet och den hydrauliska konduktiviteten skulle behöva ökas. Ett alternativ är att minska utbytet med Fysingen vilket troligtvis skulle höja de simulerade grundvattennivåerna.

Det allra viktigaste är dock att väl utförda hydrauliska tester i form av provpumpningar och infiltrationsförsök utförs. Säkrare underlag för hur de förhållandena verkligen ser ut under marken kommer att underlätta både uppbyggnaden av modellen och kalibreringen genom att ge säkrare parametervärden

6 SLUTSATS

Efter simuleringen med ett uttag av 100 L/s, utan infiltration under en månads tid, blev avsänkningen av grundvattenytan så pass liten att det inte bör finnas någon risk för att pumparna torrläggs eller att grundvattenkvaliteten påverkas negativt. Vid den transienta kalibreringen, där den simulerade och uppmätta avsänkningen från en provpumpning i fält jämfördes, var den simulerade avsänkningen betydligt lägre än den uppmätta. Detta tyder på att avsänkningen kan komma att bli större i framtida försök i fält än vad som visades i den här simuleringen. Tidigare undersökningar med provpumpningar i fält har visat att ett uttag av den här storleken under en längre tid skulle innebära en ökad hårdhet och kloridhalt för vattnet. Ett uttag, utan infiltration, ger enligt simuleringen ett konstant inflöde av sjövattnet in till grundvattentäkten vilket möjligtvis skulle kunna öka dess TOC-halt vid ett uttag under en längre tid. Ett uttag i denna storleksklass bör därför inte utföras utan infiltration.

De båda scenarierna med uttag och infiltration av 150 L/s respektive 300 L/s visade mer lovande resultat i modellen med avseende på mindre avsänkning av grundvattennivåer och inflöden från Fysingen. Infiltrationen tillsammans med ett lika stort uttag motverkar en utbredning av avsänkningen. Den avsänkningen som trots allt uppstod närmast uttagsplatsen bör inte ha någon betydande påverkan på kloridhalt eller hårdhet. Båda infiltrationsområdena verkar lämpliga att använda då ingen risk för ytavrinning kunde upptäckas. Däremot bör området runt observationsrör B5 hållas under uppsikt då grundvattenytan endast låg någon decimeter från markytan efter simuleringen av scenario 2 och 3. Då avsänkningen kan vara underskattad även i de här två scenarierna bör dock detta verifieras med hjälp av fler provpumpningar och infiltrationsförsök i fält.

REFERENSER

- Anderson, M. P and Woessner, W.W., 1992. *Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport*. P 99-123 San Diego: Academic Press.
- von Brömssen M., Gunnemyr L., Lindestrand O., Jonasson S., 2006. *Modeller för transport och spridning av föroreningar- fas 1*. Rapport för Naturvårdsverket. Tillgänglig via <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5541-0.pdf>. Hämtad 2013-10-27.
- Feflow.info. <http://www.feflow.info/aboutfeflow.html>. Hämtad 2013-10-24.
- Feflow, 2013. *Transfer Rate (Flow)*. http://www.feflow.info/html/help/default.htm?url=HTMLDocuments%2Freference%2Fparameters%2Fmaterialproperties%2Fflow%2Finoutflow_on_topbottom.htm. Hämtad 2013-10-24.
- Feflow, 2014. http://www.feflow.info/html/help/default.htm?url=HTMLDocuments%2Freference%2Fparameters%2Fmaterialproperties%2Fflow%2Fdrainfillable_porosity.htm. Hämtad 2014-03-13.
- Franklin I, 2005. *Jämförelse av beräknad och verklig grundvattensänkning vid vägportar*. Tillgänglig via: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:159200/FULLTEXT01.pdf>.
- Fredriksson K., Stadsbyggnadskontoret i Sigtuna kommun. stadsbyggnadskontoret@sigtuna.se. E-mail kontakt. Mottaget 2013-09-23.
- Grip, H och Rodhe A., 1985. *Vattnets väg från regn till bäck*. Forskningsrådets Förlagstjänst. S 11.
- Grundvattengruppen, 2008. *Norrvattens reservvattenförsörjning. Förutsättningar för konstgjord grundvattenbildning vid befintliga och potentiellt ny reservvattentäkter*. Norrvatten rapport, s. 1-87.
- Grundvattengruppen, 2011. *Mogetorpsprojektet. Grundvattenundersökningar för ny vattentäkt för Örebro i Karlslundåsen- Etapp 1*.
- Grundvattengruppen, 2012a. *Swedavia. Arlanda-Akviferlagret. Konceptuell hydrogeologisk modell*. Täby.
- Grundvattengruppen, 2012b. *Norrvatten, Märstavattentäkten. Preliminärt underlag för provpumpning och infiltrationsförsök*.
- Hanson G., 2000. *Konstgjord grundvattenbildning. 100-årig teknik inom svensk dricksvattenförsörjning*. VA-Forsk rapport.
- Johnson A. I., 1967. *Specific Yeild- Compilation of Specific Yeilds for Various Materials*. United States Gvernment Printing Office, Washington.
- WSP, 2004. *Norrvatten. Teknisk beskrivning av grundvattentäkten vid Ströms gård i Sigtuna kommun*. Utkast till beskrivning, WSP Environmental Mark och vatten uppdrag, nr 10054921.

Lantmäteriet, 2013a. GSD- Terrängkartan 5. 1:50 000, Märsta.

Lantmäteriet, 2013b. GSD- Fastighetskartan. 1:50 000, Märsta.

Lindström R., Björilin A., Åkerblad L., Hanson G., 2009. *Dricksvattenförekomster i Stockholm län. Prioriteringar för långsiktigt skydd*. VAS- rådets rapporter nr 6. S. 189-198.

Länsstyrelsen. Vatteninformationssystem Sverige (VISS).
<http://www.viss.lansstyrelsen.se/MapPage.aspx>. Hämtad 2013-09-12.

Länsstyrelsen Stockholm. *Fysingen*. (<http://www.lansstyrelsen.se/stockholm/Sv/djur-och-natur/friluftsliv/utflyktsguide/utflyktsguiden-pa-webben/Pages/7-fysingen.aspx>). Hämtad 2013-10-07.

Norrvatten, 2012. *Anmälan för samråd enligt 12 kap. 6 § miljöbalken. Provpumpning och infiltrationsförsök*. Serienummer: 2012-09-17_0888.

Orrje & Co rådgivande ingenjörer och arkitekter, 1952. *Redogörelse för grundvattenundersökning söder om Ströms gård vid Fysingen för Norrsunda kommun, Stockholms län*.

Orrje & Co rådgivande ingenjörer och arkitekter, 1961. *Österbygdens vattendomstol. PM angående provpumpning 1960-1961 av vattentäkten vid Ströms gård, Märsta kommun*. Bilaga A.

Rodhe A., Linström G., Rosberg J., Pers C., 2004. Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell. Tillgänglig via http://www.sgu.se/dokument/fou_extern/Rodhe-et-al.pdf. Report serie A No 66.

SGU, 2013a, Jordarter- SG1 1:50 000, Märsta. SGU dnr:318-1660/2013.

SGU, 2013b, Grundvatten- SG1 1:50 000, Märsta. SGU dnr:318-1660/2013.

Stockholms läns museum. http://www.stockholmslansmuseum.se/upptack_lanet/visa/b040/. Hämtat 2013-10-14.

Wallentin J., Stiglund Y., 2009. Värmdö kommun. *Utredning av påverkan på vattentäkt samt dagvattenutredning för Brunn seniorboende*.
<http://www.varmdo.se/download/18.12d3b98d13f7ba71e5a2aa4/1377167355061/Grund+och+dagvattenutredning+Vargbacken.pdf>. Sweco Environment AB, uppdrag 3430248- 100.
Hämtad 2013-09-27.

Sweco, 2008. *Tillståndsansökan Lersäter komplettering*.
<http://www.kil.se/upload/Kils%20Avfallshantering/Samr%C3%A5d%20tillst%C3%A5nd/Bilaga%205%20PM%20ang%C3%A5ende%20geologisk%20barri%C3%A4r.pdf>. Hämtad 2013-09-27.

BILAGA A

Tabell A1. Information om jordlagerföljden som fanns för några av rören och användes vid uppbyggnaden av modellen.

Rör	Observationstyp	Djup [m]	Jordart	Anmärkning
R6	spets	1 - 20	dy, lera	
		20 - 21	grus	
		21 - 24	lera	
		24 - 28,5	grus	stopp
R7	spets	1 - 16,5	lera	
		16,5 - 19,5	sand, grus	ingen anmärkning
R8	spets	0 - 2	vatten	
		2 - 4	lera	
		4 - 16	grus	stopp
R9	spets	0 - 4	grus	
		4 - 12	lera	
		12 - 13	grus	stopp
R10	spets	0 - 2,5	lera	
		2,5 - 4	grus	ingen anmärkning
R11	spets	0 - 6	lera	
		6 - 14	grus	ingen anmärkning
R12	spets	0 - 2	lera	
		2 - 6	grus	stopp
R13	spets	0 - 1	lera	
		1 - 9	grus	ingen anmärkning
R14	spets	0 - 9	grus	stopp
R15	spets	0 - 3	lera	
		3 - 4	sand	stopp
R16	spets	0 - 3	lera	
		3 - 9	sand	lerblandad, stopp
R17	spets	0 - 9	grus	stopp
R18	spets	0 - 25,5	lera	
		25,5 - 30	sand	stopp
R19	spets	0 - 9	grus	ingen anmärkning
R20	spets	0 - 17	grus	stopp
R21	spets	0 - 4,5	sand	stopp
R22	spets	0 - 4,5	lera	
		4,5 - 5,5	sand, grus	stopp
R23	spets	0 - 5,5	lera	
		5,5 - 6,7	grus	stopp
R24	spets	0 - 4	grus	stopp
R25	spets	0 - 8	lera	
		8 - 10	grus	
		10 - 13	sand	stopp

R26	spets	0 - 10	grus	
		10 - 11	flytsand	stopp
R27	spets	0 - 7,5	lera	
		7,5 - 8,5	sand	stopp
S04138	sondering	0 - 1	lera	
		1 - 6,4	stenig, grusig sand	hugger, släpper
S04139	sondering	0 - 12,6	lera	
		12,6 - 13,2	växlande lera-sand	ingen anmärkning
S04140	sondering	0 - 9,8	lera	
		9,8 - 17	stenig, grusig sand	hugger, släpper
S04141	sondering	0 - 4,7	lera	
		4,7 - 4,9	morän	småstenigt
S04142	sondering	0 - 5,9	lera	
		5,9 - 6,1	grusig sand	småhugger
		6,1 - 7,5	lera	
		7,5 - 11,8	växl. lera - sand	
		11,8 - 12,8	morän	stenigt, småhugger
S04143	sondering	0 - 26,5	lera	ingen anmärkning
R05047	spets	0 - 6	stenig, grusig sand	hugger, släpper
Rb8608		0 - 0,2	matjord	
		0,2 - 5,0	siltig sand	
		5,0 - 8,0	grusig sand	god vattengenomsläpplighet
		8,0 - 11,0	grusig sand	mindre god
		11,0 - 15,6	grusig sand	mycket god
		15,6		borrning avslutad, fortsatt borrning möjlig
Rb8608		0 - 0,2	matjord	
		0,2 - 2,0	siltig sand	
		2,0 - 11,0	något grusig, siltig sand	mycket god vattengenomsläpplighet
		11,0 - 18,0	något grusig, siltig sand	god
		18,0 - 19,0	något grusig, siltig sand	mycket god
		19,0 - 19,9	grusig morän	god
		19,9		borrningen avslutad, fortsatt borrning möjlig

BILAGA B

Resultatet över grundvattennivåer efter kalibreringen för samtliga observationsrör inom modellområdet visas i B1. Dessa nivåer användes sedan som grund för simuleringen av de olika scenarierna.

Tabell B1. Simulerade värden från kalibreringen av stationära, ostörda förhållanden för samtliga observationsrören.

Observationsrör	MÖH [m]
R 6	2,30
R 7	2,47
R 8	2,10
R 9	2,17
R 10	2,20
R 11	2,22
R 12	2,21
R 13	2,22
R 14	2,28
R 15	2,50
R 16	2,47
R 17	2,49
R 18	2,52
R 19	2,56
R 20	2,96
R 21	12,2
R 22	13,8
R 23	13,1
R 24	17,4
R 25	17,6
R 26	18,1
R 27	19,0
B 2	2,54
B 3	2,16
B 4	15,1
B 5	14,9
Rör 20	2,94
K 16	17,6
K 13	17,5
Åholmen, Str\366m	2,17
Vallstannäs	2,16
R 05047	2,49
S 04138	2,55
S 04139	2,49
S 04140	2,38
S 04141	2,43
S 04142	2,43
S 04143	3,14

Arlandabanan	10,4
Arlandabanan, 260 m SSO BI\345sut	12,9
Arlandabanan,570m	17,0
SSO Norrs.k:	
Arlandabanan,460m	18,2
SO Norrs.k:a	
Arlandab.,270m	16,7
OSO Norrs.k:a	
33 020	18,8
32 920	18,7
33 820	18,4
32 740	18,2
32 544	17,3
32 439	16,7
32 421	16,6
32 330	15,9
A	2,18
B	2,17
C	2,93
Rb8801	2,40
Rb8609	27,2
Rb0103	24,7
110919E	27,4
Rb8608	27,6
110919D	27,7

BILAGA C

De fullständiga värdena för de olika uttagsscenarierna kan utläsas i tabell 6, 7 och 8. Då de inte fanns uppmätta värden för alla rörs marknivåer i fält hämtades dessa från markytans nivå i modellen istället. Dessa kan ses som de blåmarkerade värdena i tabellerna.

Tabell C1. Resultat från uttag av 100 L/s.

Rör	Uppmätt grundvattennivå 2013-11-05	Innan	Efter	Förändring efter uttag	Uppmätta marknivåer
110919D	27,421	27,75033	27,75052	0,00019	36,31
Rb8608	27,41	27,69438	27,69474	0,00036	33,08
110919E	27,406	27,51774	27,5188	0,00109	31,36
Rb8609	27,394	27,25596	27,2576	0,00161	33,35
33020	18,814	18,86152	18,86183	0,00031	20,33
B5	14,594	14,91266	14,9067	-0,00596	15
32544	18,294	17,31322	17,31487	0,00165	23,45
32421	17,754	16,57734	16,57795	0,00061	22,4
K13	17,074	17,46246	17,46245	-1E-05	21,64
Arlandabanan,460m	16,924	18,12141	18,12143	2E-05	25,4
Arlandabanan,570m	16,514	16,96096	16,96096	0	23,7
Rör 20	2,606	3,012477	2,781883	-0,23059	7,4
R19	2,361	2,627365	2,314618	-0,31275	9,1
Rb8801	2,3	2,471055	2,100425	-0,37063	4,52
R14	2,265	2,333664	1,86202	-0,47165	3,7
R13	2,307	2,24939	1,61049	-0,6389	3,5
R12	2,337	2,248528	1,738217	-0,51031	2,8
R10	2,374	2,236856	1,844574	-0,39228	2,9
B	2,314	2,187611	1,987293	-0,20032	3,47

Tabell C2. Resultat från uttag av 150 L/s och infiltration med 150 L/s.

Rör	Uppmätt grundvattennivå å 2013-11-05	Innan	Efter	Förändring efter uttag	Uppmätta marknivåer
110919D	27,421	27,75033	27,75053	0,0002	36,31
Rb8608	27,41	27,69438	27,69477	0,00039	33,08
110919E	27,406	27,51774	27,5189	0,00113	31,36
Rb8609	27,394	27,25596	27,2575	0,00155	33,35
33020	18,814	18,86152	18,86244	0,00092	20,33
B5	14,594	14,91266	15,00025	0,08759	15
32544	18,294	17,31322	17,31979	0,00657	23,45
32421	17,754	16,57734	16,57932	0,00198	22,4
K13	17,074	17,46246	17,46323	0,00077	21,64
Arlandabanan, 460m	16,924	18,12141	18,12143	2E-05	25,4
Arlandabanan, 570m	16,514	16,96096	16,96097	1E-05	23,7
Rör 20	2,606	3,012477	5,751513	2,739036	7,4
R19	2,361	2,627365	3,623409	0,996044	9,1
Rb8801	2,3	2,471055	2,898511	0,427456	4,52
R14	2,265	2,333664	2,22218	-0,11149	3,7
R13	2,307	2,263238	1,66082	-0,60242	3,5
R12	2,337	2,24907	1,815479	-0,43359	2,8
R10	2,374	2,236856	1,89282	-0,34404	2,9
B	2,314	2,187611	2,022233	-0,16538	3,47

Tabell C3. Resultat från uttag av 300L/s och infiltration med 300L/s.

Rör	Uppmätta grundvattennivåer 2013-11-05	Innan	Efter	Förändring efter uttag	Uppmätta marknivåer
110919D	27,421	27,75033	27,75055	0,00022	36,31
Rb8608	27,41	27,69438	27,6948	0,00042	33,08
110919E	27,406	27,44385	27,5189	0,07507	31,36
Rb8609	27,394	27,25596	27,2576	0,00168	33,35
33020	18,814	18,86152	18,86239	0,00087	20,33
B5	14,594	14,91266	14,99717	0,08451	15
32544	18,294	17,34142	17,31941	-0,02201	23,45
32421	17,754	16,61971	16,57922	-0,04049	22,4
K13	17,074	17,54424	17,46321	-0,08103	21,64
Arlandabanan,460m	16,924	18,20711	18,12143	-0,08568	25,4
Arlandabanan,570m	16,514	17,07582	16,961	-0,11486	23,7
SSO					
Rör 20	2,606	3,012477	5,661149	2,648672	7,4
R19	2,361	2,627365	3,490699	0,863334	9,1
Rb8801	2,3	2,471055	2,73983	0,268775	4,52
R14	2,265	2,333664	1,99958	-0,33409	3,7
R13	2,307	2,263238	1,29968	-0,96356	3,5
R12	2,337	2,24907	1,605924	-0,64315	2,8
R10	2,374	2,236856	1,971304	-0,26555	2,9
B	2,314	2,188871	2,392851	0,20398	3,47