UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 20011
Examensarbete 30 hp
Juli 2020

Förstärkt grundvattenbildning genom bortpumpning av salt grundvatten – modellering av lokala effekter och identifiering av plats för pilottest på Gotland

Harald Edlund

Examensarbete 30 hp inom civilingenjörsprogrammet Miljö-&Vattenteknik

Handledare - *Fritjof Fagerlund*
Examinator - *Fritjof Fagerlund*
Ämnesgranskare - *Roger Herbert*

Copyright © Harald Edlund och Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, 15 juli 2020.
UPTEC W 20011, ISSN - 1401-5765.

Referat

Gotland lider till och från av vattenbrist under sommaren, problemen förväntas även öka i samband med klimatförändringar och expanderande antropogen påverkan. Under vinterhalvåret får Gotland mer än tillräckligt med sötvatten för att täcka efterfrågan, problemet uppkommer från att majoriteten av vattnet evapotranspireras samt går till ytavrinning till Östersjön. Ytterligare en orsak till vattenbristen beror på att Gotlands grundvatten omges av saltvatten. Saltvattnet kring Gotland bildar en konkav gräns mellan sött och salt vatten i grundvattenmagasinet vilket väsentligt begränsar den möjliga lagringen av sött grundvatten. För att hjälpa till att lösa problemen med vattenbrist på Gotland introducerades en idé att utöka andelen sött vatten i grundvattenmgasinen genom att pumpa salt grundvatten från djupet under återhämtningsperioden.

Arbetet påbörjades genom att undersöka en lämplig plats på Gotland, både ur en modelleringssynpunkt samt inför ett eventuellt fortsatt arbete. Två platser valdes slutligen där en 2D-grundvattenmodell skapades vid båda platserna med hjälp av GMS, MODFLOW, MT3DMS och SEAWAT. I modellen implementerades två uttagsbrunnar, en för salt grundvatten från djupet och en för sött grundvatten närmare ytan. Eftersom modellen skapats i 2D innebär det det en förenkling av geometrin och modellresultat motsvarar då en horisontellt borrad brunn, därför anges resultaten som flöde per meter horisontell brunn. Förhoppningen var att genom simulering kunna påvisa en ökning av sötvatten i grundvattenmagasinet genom att extrahera salt grundvatten under återhämtningsperioden. målet är att undersökningarna ska leda till en implementering av metoden i verkligheten i ett försök att minska vattenbristen.

Modellresultat för plats 1 indikerar att volymen sött vatten i akviferen ökar med $\frac{1}{3}$ av uttaget när endast salt vatten extraheras. Det maximala uttagsflödet vid plats 1 för endast salt vatten bestämdes till $35\frac{m^3}{\text{år}}$ per meter. Vid ett saltvattenuttag på $35\frac{m^3}{\text{år}}$ vid plats 1 ökar sötvattenvolyem i akviferen t.ex. med $340m^3$ per meter efter 10 år.

Modellresultat för plats 2 indikerar att volymen sött vatten i akviferen ökar med $\frac{1}{5}$ av uttaget när endast salt vatten extraheras. Det maximala uttagsflödet vid plats 2 för endast salt vatten bestämdes till $65\frac{m^3}{\text{år}}$ per meter. Vid ett saltvattenuttag på $65\frac{m^3}{\text{år}}$ vid plats 2 ökar sötvattenvolyem i akviferen t.ex. med $940m^3$ per meter efter 10 år.

Institutionen för geovetenskaper. Luft-, Vatten- och Landskapslära.
Uppsala Universitet, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige.
ISSN - 1401-5765.

Abstract

Reinforced groundwaterrecharge by removal of saline groundwater - modeling of local effects and identification of location for pilot study on Gotland

Gotland suffers from a shortage of drinking water at infrequent intervals which is only predicted to get worse with time. The problem is not a shortage of precipitation, the shortage lies in the combined problem of runoff and high water usage during the summer months. From September to March there is an abundance of water which mostly goes to runoff into the sea surrounding Gotland. Due to the fact that Gotland is an island, a concave boundry is formed between the deeper saline groundwater and the fresh groundwater closer to the surface. In an effort to possibly help in solving the water shortage, an idea was introduced to pump out the saline groundwater from the deep and thus creating an increase in storage of fresh groundwater.

Firstly an investigation into suitable locations for modeling was conducted where two sites were chosen. To test this concept and see if the idea was feasable a 2D-model was established using GMS, MODFLOW, MT3DMS and SEAWAT with the aim of simulating the groundwater at the well chosen sites on Sudret, Gotland. Two wells were implemented in the model, one for extracting fresh groundwater and one for extracting saline groundwater. The hopes were to be able to simulate an increase of the storage of fresh water during the recharge period and thus helping to solve the problem with insufficient water during the strenuous summer months. Hopefully the results of the simultations can make up the foundations for an implementation of the concept at a location at Gotland.

Results for site 1 indicate that the volume of fresh water in the akvifer can be increased by $\approx \frac{1}{3}$ of the extraction volume when only saline groundwater is removed. The maximum flow of only saline extraction at site 1 has been determined to $35\frac{m^3}{\text{å}r}$ per meter. For example, with only an extraction of saline water of $35\frac{m^3}{\text{å}r}$ at site 1 the fresh water in the aquifer will increase by $340m^3$ per metre after 10 years.

The model indicates that the volume of fresh water in the akvifer can be increased by a minimum of $\frac{1}{5}$ of the saline extraction volume when only saline water is removed. The maximum flow of only saline groundwater at site 2 was decided to be $65\frac{m^3}{\text{å}r}$ per meter. For example, with only an extraction of saline water of $65\frac{m^3}{\text{å}r}$ at site 1 the fresh water in the akvifer will increase by $940m^3$ per metre after 10 years.

Institutionen för geovetenskaper. Luft-, Vatten- och Landskapslära.
Uppsala Universitet, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige.
ISSN - 1401-5765.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Gotland är en ö som ligger ungefär 9 mil utanför den svenska östkusten, dom senaste åren har Gotland upplevt en vattenbrist i en större utsträckning än tidigare och någonting måste göras för att lösa vattenproblemen framöver. I samband med att populationen, turismen och jordbruken ökar på Gotland blir efterfrågan på dricksvatten allt större. Vattenefterfrågan på Gotland är beräknad att stiga med ungefär 40% till 2045 vilket den årliga nederbörden mer än klarar av att tillgodose. Problemen uppkommer på grund av tunna jordlager och en relativt impermeabel berggrund som ökar ytavrinningen och minskar infiltrationen till grundvattenmagasinen.

I dagsläget försörjer sig 40% av befolkningen på Gotland med dricksvatten från privata brunnar, resterande vatten produceras kommunalt från grundvattentäkter. Endast en liten andel av ytvattnet på Gotland används idag och då främst till jordbruk. Grundvatten är en vattenresurs som ligger gömd både i jord och berggrund, eftersom Gotland omges av Östersjön gör det att grundvattenmagasinen innehåller både salt och sött grundvatten. På grund av det begränsas andelen användbart sötvatten av det omgivande salta vattnet som lägger sig under det söta grundvattnet. Berggrunden på Gotland består till mestadel av kalksten och märgel där grundvattnet samlas i spricksystem där magasineringsförmågan anses som relativt låg (Dahlqvist m. fl., 2019).

För att försöka minska vattenbristen presenterades en idé att pumpa ut salt grundvatten från djupet under vinterhalvåret då det finns ett överskott av vatten. Genom att ta ut salt vatten var tanken att mer sötvatten skulle kunna fylla upp grundvattenmagasinet som sedan kan användas under sommaren. För att testa konceptet har uttag av grundvatten vid två platser på Gotland modellerats med programvaran GMS, MODFLOW, MT3DMS och SEAWAT. Förhoppningen med arbetet är att metoden någon gång ska testas i verkligheten på Gotland och hjälpa de personer som drabbas av vattenbristen.

Modelleringsresultat påvisar att det går att öka volymen sött vatten grundvattenmagasinen på Gotland. Simuleringar indikerar att det går att öka grundvattenmagasinet vid plats 1 med $\approx \frac{1}{3}$ av saltvattenuttaget. Simuleringar visar att det går att öka grundvattenagasinet vid plats 2 med minst $\frac{1}{5}$ av saltvattenuttaget. Om det skulle gå att implementera konceptet på ett funktionellt sätt i verkligheten skulle det innebära minskade ekonomiska kostnader och ökade möjligheter för population, turism och jordbruk.

Innehåll

1 Introduktion **6**

2 Syfte **6**
2.1 Bakgrund 7
2.2 Problemformulering 8

3 Teori **10**
3.1 Geohydrologi 10
3.1.1 Hydraulisk Konduktivitet 12
3.1.2 Grundvattenbildning 13
3.1.3 Gotlands berggrund och grundvattenmagasin 14
3.2 GMS 15
3.2.1 MT3DMS 15
3.2.2 SEAWAT 16

4 Metod **17**
4.1 Val av plats 17
4.2 Geologisk modell 27
4.3 Grundvattenmodell 2D 28
4.4 Simulering av gräns mellan sött och salt grundvatten 30
4.5 Slutgiltiga parameterval 32
4.6 Uttag av grundvatten 33

5 Resultat **36**
5.1 Plats 1 37
5.2 Plats 2 43

6 Diskussion **47**
6.1 Koncentration salt 47
6.2 Volym sötvatten 49
6.3 Förbättringar och osäkerheter 52
6.4 I praktiken 55
6.5 Sammanfattning av frågeställningar 56

7 Slutsats **58**

8 Bilagor **62**

1 Introduktion

Vattenförbrukningen vid kustområden förlitar sig ofta till stor del på lokala akviferer. Det uppskattas att ungefär en fjärdedel av jordens befolkning bor vid kustlinjen, det gör att en stor efterfrågan skapas på sötvatten vilket resulterar i en stor påverkan på grundvattenmagasinen i dessa områden. Dessutom beräknas befolkningen dubbleras vid kustområden till 2030 (Adger m. fl., 2005).

De grundvattenmagasin och andra sötvattentillgångar som finns i kustområden är ofta utsatta för överexploatering och saltvatteninträngning. Med kommande klimatförändringar förespås ökade havsnivåer och frekvenser av stormar vilket kommer intensifiera problemen med saltvatteninträngning (Change, 2007).

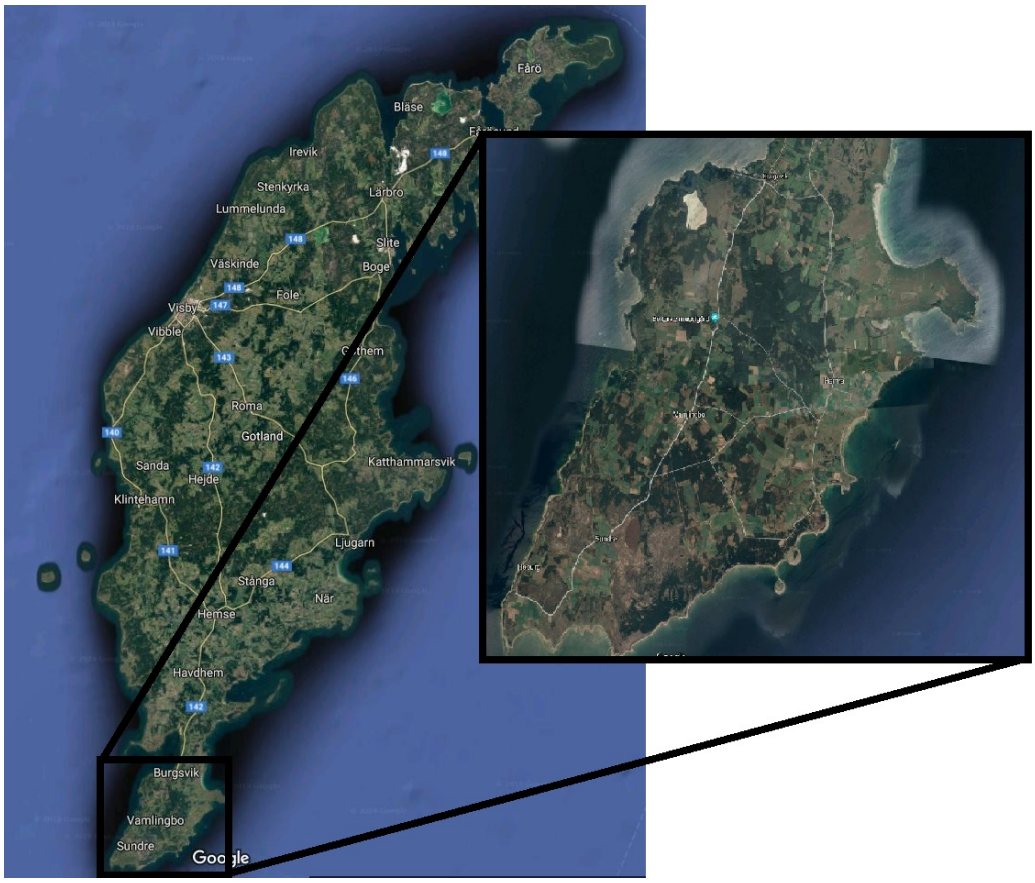
Gotland är inget undantag för ovan nämnda fenomen vilket ofta leder till vattenbrist och begränsingar i vattenanvädning, senast sommaren 2018 drabbades Gotland av en stor torka som kostade regionen miljontals kronor (Region Gotland, 2019c). I samband med att Gotlands population förväntas öka tillsammans med den stora sommarturismens stress på vattentillgångarna måste Gotlands vattenförsörjning utökas (Region Gotland, 2019a). Flera olika innovativa lösningar har undersöks av SGU i ett försök att öka grundvattenbildningen och grundvattentillgången på Gotland, dessa inkluderar bland annat anläggandet av våtmarker, dammar och infiltrationsanläggningar. Det framgår att bästa lösningen inte är ett utan flera kombinerade alternativ (SGU, 2017b). Ytterligare förslag att öka vattentillgången är därför av vikt för att lösa problemen med torka på Gotland.

2 Syfte

För att undersöka möjliga metoder för att minska vattenbristen på Gotland har arbetet syftat till att göra noggranna grundvattenutredningar på två väl utvalda områden på Sudret på södra Gotland, se figur 1. På platserna har det ställts upp en 2D-modell i *GMS* med hög upplösning med målet att efterlikna verkligheten i högsta möjliga grad.

Arbetets mål har varit att simulera ett uttag av salt grundvatten från djupet under vinterhalvåret vilket förhoppningsvis leder till en ökad lagring av sött grundvatten. Därmed ökas den tillgängliga volymen sötvatten vilket är av stor vikt under sommaren. Utöver att pumpa ut salt grundvatten under återhämtningsperioden har det simulerats ett uttag under sommarhalvåret för att se om det gick att hitta ett samband mellan dessa som maximerar sötvattenuttaget. En del av projektet var att välja en funktionell plats, både ur en modelleringssynpunkt men även ur praktiska aspekter inför ett eventuellt pilotprojekt.

Syftet har alltså varit att undersöka om det går att få en ökad magasinering av sötvatten genom att ta ut salt grundvatten. Förhoppningen är att arbetet ska leda till ett pilotprojekt där metoden beprövas i praktiken och hjälper de människor som är i behov av vatten. En enklare ekonomisk kostnadskalkyl av projektet har även tagits fram som komplement till underlaget.



Figur 1: *Översiktlig bild över Sudret på Gotland. Från Google Maps.*

För att underlätta arbetet togs följande frågeställningar fram:

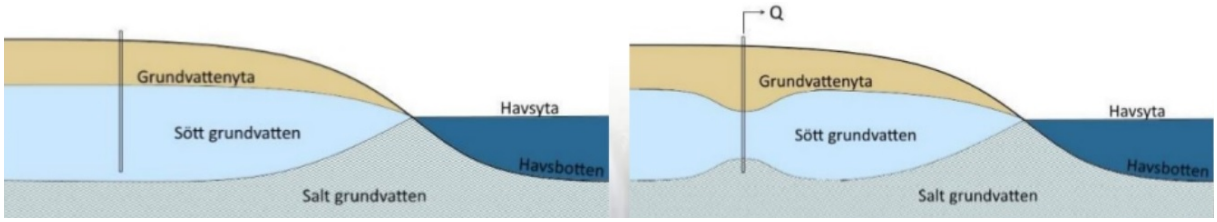
- Till vilken grad går det att öka den naturliga grundvattenmagasineringen på den valda platsen?
- Hur påverkas gränsen mellan sött och salt vatten samt dynamiken mellan vattenmassorna vid ett uttag av saltvatten?
- Hur påverkar ett sötvattenuttag, under sommaren, grundvattenmagasinet? Dvs vad är den maximala volym sötvatten som går att ta upp för att samtidigt bibehålla en balans mellan magasinering och uttag?
- Hur känslig blir modellen för parameterosäkerheter?

2.1 Bakgrund

Under sommarhalvåret lider Gotland ofta av vattenbrist, detta till följd av att grundvattenmagasinen belastas mer än vad de hinner återhämtas under vinterhalvåret (SGU, 2019b). Vatten används bland annat till jordbruket och mängden turister som befinner sig på ön

under sommaren. Varje år besöker ungefär 1.000.000 turister Gotland och en absolut majoritet under sommaren vilket är relativt många då det totalt bor 59.000 personer på Gotland. Samtidigt förväntas populationen öka med ca 300 personer per år (Region Gotland, 2019a). Populationsökning och ökad turism kombinerat med Gotlands soliga sommarklimat med låg nederbörd (SMHI, 2019) skapar ofta stora problem med torka. På vissa platser förekommer även föroreningar i grundvattenmagasinen (Region Gotland, 2019b). Dessa problem, främst vattenbristen, har lett till undersökningar av nya metoder för att utöka magasineringen i de naturliga akvifererna.

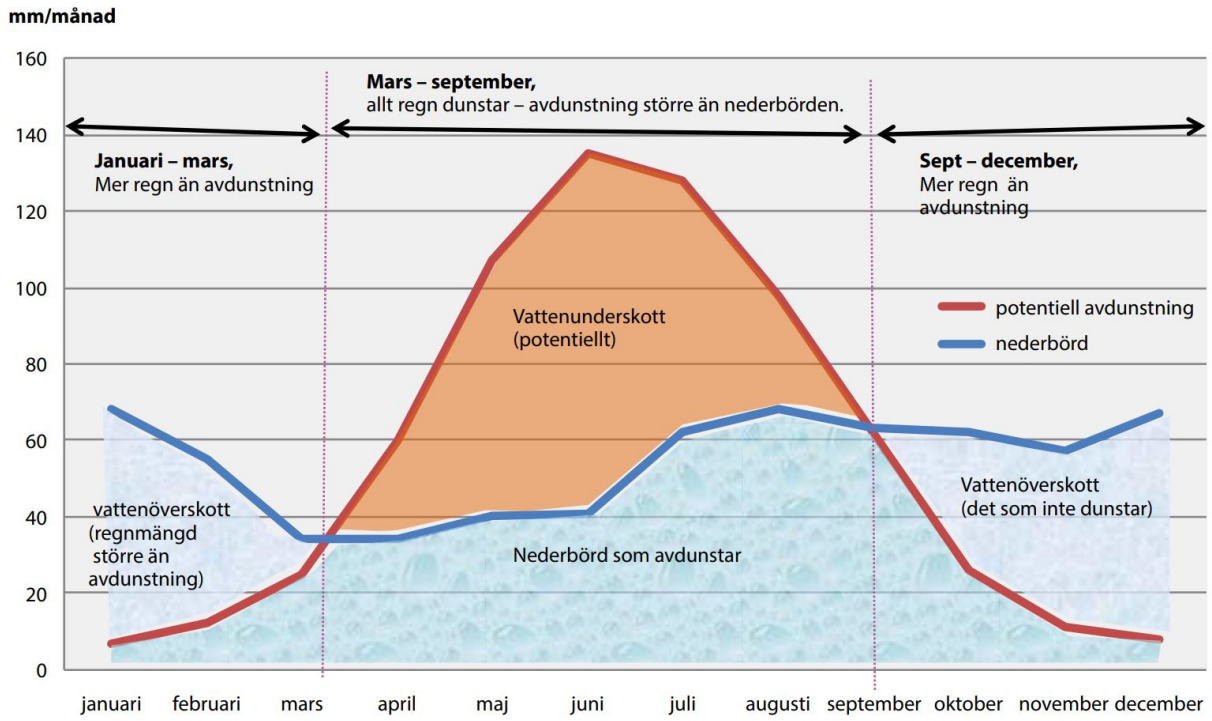
Ett försvårande problem är att volymen sött grundvatten begränsas av det omgivande salta vattnet i Östersjön som skapar en gräns under grundvattenreserven av sött vatten där allt vatten är salt, se figur 2. Det betyder att det finns en avdelande gräns mellan sötvattnet och saltvattnet i bergrunden, där det salta vattnet med högre densitet ligger djupare och sötvattnet med lägre densitet ligger närmare ytan. Vid torrperioder samt vid uttag av sötvatten kan även skiktet till sötvattnet blandas och bli salt och därmed bli oanvändbart för direkt användning, detta kallas saltvatteninträngning. Saltvatteninträngning är ett stort problem på just Gotland då det på vissa platser är grunt till det salta vattnet som vid uttag av sötvatten kan komma att sugas upp och kontaminera dricksvattnet, se figur 2.



Figur 2: *Effekt av saltvatten gränsande till grundvattenmagasin, likt det som sker på Gotland. Det är mellan vattenmassorna innehållande sött och salt vatten som den diffusa gränsen bräckt vatten befinner sig. Till vänster i figuren visas hur ett grundvattenmagasinet kan se ut vid jämvikt. Till höger visas hur grundvattenmagasinet kan se ut efter påbörjat vattenuttag, här stiger saltvatten mot uttagspunkten och även grundvattenytan sjunker kring pumpen.*

2.2 Problemformulering

Problemet på Gotland är den begränsande sötvattentillgången kontra den stora efterfrågan. Problemen med torka uppstår främst på sommarhalvåret då efterfrågan på sötvatten är störst.



Figur 3: *Vattenbalans på Gotland över året. Med tillstånd (Region Gotland, 2019d).*

Figur 3 visar att det finns ett överskott av vatten, i form av nederbörd, under september-mars. Detta överskott fyller vanligtvis upp grundvattenmagasinet relativt fort och resterande vatten rinner sedan ut i Östersjön och blir oanvändbart. Under sommaren ses på liknande sätt att den potentiella avdunstningen är mycket högre än nederbörden vilket innebär att i princip allt vatten avdunstar eller tas upp av växter vilket leder till att en väldigt liten andel infiltreras till grundvattenmagasinet. Problemformuleringen fokuseras kring att på något sätt nyttja det överskott av regnvatten som finns under vinterhalvåret och spara det till den torra sommarperioden när behovet är som störst.

Ett tidigare examensarbete har gjorts för att undersöka en metod där man pumpar ut salt grundvatten under vinterhalvåret och på så sätt möjliggöra en större magasinering av användbart, dvs icke salint, vatten till sommaren. Resultat från projektet visar att det finns viss potential att öka grundvattenbildningen genom bortpumpning av saltvatten och därmed eventuellt minska problemen med vattenbrist (Andersson, 2019).

3 Teori

Här har grundläggande begrepp, relevanta för en djupare förståelse av resultaten, beskrivits. Här innefattas grundläggande geohydrologi, förutsättningar på Gotland samt modelleringsmjukvaran.

3.1 Geohydrologi

Geohydrologi, eller Hydrogeologi, är vetenskapen kring hur vatten beter sig i mark, grundvattnets flöde och dess transport.

Hur vattnet flödar i en generell mening över en större area definieras av ett *avrinningsområde*, vilket definieras som den sammanhängande markarea där ytavrinningen flödar mot en punk. Ett avrinningsområde kan även bestå av flera mindre delavrinningsområden. Avgränsningarna till ett avrinningsområde, kallade vattendelare, bestäms ofta av topografin eller andra tydliga gränser, t.ex. höjdryggar eller hav. Se figur 14 för avrinningsområden på Sudret (EU, 2000).

Vattnets mer specifika flöde i marken beskrivs primärt av en ekvation; *Darcy's lag*, se ekvation 1. Darcys lag beskriver vattenflödet i ett poröst medium som den hydrauliska konduktiviteten multiplicerat med flödets tvärsnittsarea samt den hydrauliska gradienten (Grip och Rodhe, 2019).

$$Q = -KA\frac{dh}{dl} \tag{1}$$

Där

Q är vattenflödet $[\frac{m^3}{s}]$
A är tvärsnittsarean $[m^2]$
$\frac{dh}{dl}$ är den hydrauliska gradienten [-]

Ett unikt fenomen som sker när ett grundvattenmagasin gränsar till saltvatten är bildningen av ett skikt mellan sött och salt vatten, det bildas likt en lins av sötvatten ovanpå det salta vattnet. Gränsen uppstår på grund av att saltvatten har högre densitet och lägger sig då under sötvattnet. Övergången mellan vattenmassorna är oftast inte en tunn skarp gräns utan kan ibland vara flera meter tjock på grund av hydrologisk dispersion och blandning av vattnet. (Holt m. fl., 2019)

Gränsen mellan vattenmassorna bildas under mycket långt tid, främst genom nederbörd som infiltrerar ner i marken som spolar ut saltvattnet. Vid översvämning påverkas gränsen mest vid områden med hög vertikal konduktivitet då vattnet blandas mer i vertikal riktning och därmed påverkar gränsen mellan vattenmassorna som normal ligger horisontellt. Överexploatering av grundvattenmagasin ökar även risken för saltvatteninträngning och biologiska föroreningar som t.ex. organiskt material och kemiska ämnen t.ex. tungmetaller från ytan

(Bakker, 2000). Problemet är då att vattnet kan bli både förorenat och/eller salt och därmed oanvändbart som både dricksvatten och för bevattning av grödor. Saltkoncentrationer över $1000\frac{mg}{L}$, detsamma som $1\frac{kg}{m^3}$, anses ofta som odrickbart (Australian government, 2019). Genom arbetet har sött vatten definierats som det vatten innehållande $\leq 1\frac{kg}{m^3}$ TDS, alla koncentrationer över det har deifnierats som salt vatten. TDS, Total Dissolved Solids, är ett mått på salinitet i vatten där flertalet vanliga salter mäts (SA health, 2020).

Hur en vätska sprids i ett poröst medium beskrivs av *dispersiviteten*, när det handlar om hur saltvatten sprids in i sötvatten kallas det hydrodynamisk dispersion. En låg dispersion innebär mindre spridning på grund av att vattnet flödar homogent. Dispersion sker antingen längs flödesriktningen, longitudinell dispersion, eller vinkelrätt mot flödet, vertikal dispersion, eller mot flödet vilket kallas transversell dispersion. Dispersionens effekt blir särskilt tydlig om gränsen mellan sött och salt grundvatten skulle förändras under kort tid. (Day, 1956)

Förenklat kan den longitudinella dispersionen definieras som (Ebrahimi m. fl., 2018):

$$D_L = \alpha_L v \tag{2}$$

Där

D_L är den longitudinella dispersionskoefficienten $[\frac{m^2}{s}]$
α_L är den longitudinella dispersiviteten [m]
v är flödeshastigheten $[\frac{m}{s}]$

Hur mycket vatten som kan uppehållas i en viss berggrund defineras av dess *porositet*. Porositeten anges i [%] och beskriven andelen hålutrymmen som kan fyllas med vatten. Lera har t.ex. väldigt hög porositet, ibland närmare 90% medan sand och väldigt sprickig berggrund har ungefär 25-50% porositet (Ge och Gorelick, 2014). Porositeten beräknas vanligtvis enligt ekvation 3. Porositeten är alltså starkt kopplat till berggrundens magasineringsförmåga. Vid vattenuttag är även den *effektva porositeten* väldigt viktig att nämna, denna definieras som porositeten minus fältkapaciteten och är alltså volymen dränerbart vatten (SGU, 2017a).

$$n = \frac{V_p}{V} \tag{3}$$

Där

n porositeten är [%]
V_p är porvolymen $[m^3]$
V den totala volymen $[m^3]$

Något som brukar relateras till porositet är *Specifika vattenavgivningstalet*, S_y, som beskriver hur mycket vatten som lämnar en öppen akvifer per areaenhet när den hydrauliska potentialen minskas. Specifika vattenavgivningstaletalet definieras enligt ekvation 4 (Bear, 1979).

$$S_y = n - S_r \tag{4}$$

Där

S_y är det specifika vattenavgivningstaletalet [-]
n är porositeten [%]
S_r de specifika retentionen [-]

Hur vatten lagras i en sluten akvifer beskrivs av *magasinskoefficienten*, S, vilken är en produkt av djupet mättad mark och den *specifika magasinskoefficienten* S_s, se ekvation 5 (Ferris m. fl., 1962).

$$S = S_s b \tag{5}$$

Där

S är magasinskoefficienten [-]
S_s är den specifika magasinskoefficienten $[\frac{1}{m}]$
b akviferens mäktighet $[m]$

Den *specifika magasinskoefficienten* kan beräknas med hjälp av ekvation 6 (Ferris m. fl., 1962).

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \tag{6}$$

Där

S_s är den specifika magasinskoefficienten $[\frac{1}{m}]$
ρ är vattnets densitet $[\frac{kg}{m^3}]$
g är tyngdaccelerationen $[\frac{m}{s^2}]$
α är akviferens kompressibilitet $[\frac{m^2}{N}]$
n är porositeten [-]
β är vattnets kompressibilitet $[\frac{m^2}{N}]$

3.1.1 Hydraulisk Konduktivitet

En av de viktigaste parametrarna för att beskriva hydrogeologin i marken är den *hydrauliska konduktiviteten*. Konduktiviteten definierar hur lätt en vätska flödar genom ett poröst medium, det är alltså en materialunik egenskap som bestämmer hur lätt ett material släpper igenom vatten eller annan vätska. Enheten för hydraulisk konduktivitet är $\frac{m}{s}$ men beräknas som volym per area och tid, $\frac{m^3}{\frac{m^2}{s}}$, och får därför ej förväxlas med hastighet som också har

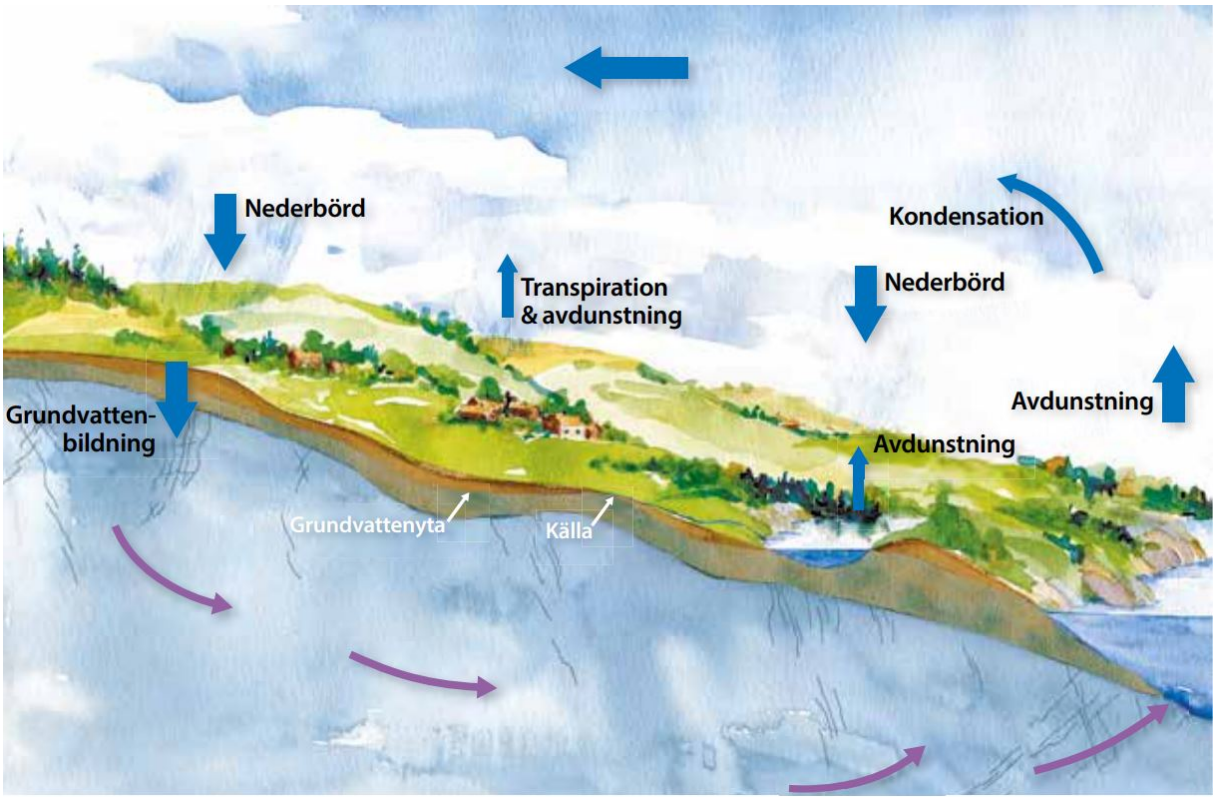
enheten $\frac{m}{s}$ (Charles, 2001).

Genomsläppligheten på Gotland ses på många platser som relativt låg, speciellt i vertikalled där flödet i första hand sker i isolerade sprickor (Golder Associates, 2017b). Den horisonella konduktiviteten på Gotland anses ofta som väldigt heterogon och därmed kan de lokala flödena ha stor variation (Golder Associates, 2017a).

Den hydrauliska konduktiviteten går att uppskatta genom flera olika metoder t.ex. undersöka markens kornstorlek eller flödesförsök på plats eller mer kontrollerat laboratorium. En väl använd metod i Sverige, för att beräkna hydraulisk konduktivitet, är med hjälp av Gustafsons metod.

3.1.2 Grundvattenbildning

Ytterligare en parameter som har stor påverkan på hydrogeologin är *grundvattenbildningen*. Grundvattenbilningen styrs av det hydrologiska kretsloppet vilket är den oändliga sammanhängande cykel där vatten rör sig genom jordens alla system. Drivkraften bakom processen är solens enegi vilken evaporerar vatten från markytan och vattenkällor till atmosfären. Vatten tillförs även atmosfären från växter genom transpiration. Evaporation och transpiration heter tillsammans evapotranspiration. Vatten tillförs sedan till markytan genom nederbörd där det antingen infiltreras eller rinner av ytan. Nettonederbörden beräknas ofta som den totala nederbörden minus evapotranspirationen, nettonederbörden är även den potentiella grundvattenbildningen (SGU, 2017b). En viss del av det vatten som infiltrerar blir en del av grundvattnet och definieras som grundvattenbildningen. Vattnet rör sig genom berggrunden genom komplexa system där det renas och slutligen kommer ut till källor, vattendrag, sjöar och hav. Uppehållsiden för vattnet i berggrunden varierar från dagar till tusentals år (Ge och Gorelick, 2014).



Figur 4: *Vattentäkter på Gotland. Med tillstånd (Region Gotland, 2016a).*

Grundvattenbildning är alltså den naturliga process som återför och fyller upp grundvattentäkter och mäts normalt i $[\frac{mm}{år}]$. På Gotland minskas grundvattenbildningen till stor del på grund av ytavrinning, det sker främst om ytlagret har en dålig inflitrationskapacitet eller om grundvattenmagasinet blir överfyllda (SGU, 2017b).

3.1.3 Gotlands berggrund och grundvattenmagasin

Berggrunden på Gotland består främst av uppsprucken kalksten, från ca 430 miljoner år sedan, vilken ofta går upp i dagen eller täcks av tunna jordlager. I kalksten rinner vattnet endast i små sprickor där transporten sker fort samtidigt som den innehar en relativt låg porositet jämfört med t.ex. rullstensås bestående av grus där transporten sker långsamt men med en högre volym vatten (hög porositet). Kalkstensberggrunden presenterar bland annat en föroreningsrisk eftersom små mängder vatten (alt. föroreningar) kan transporteras långa sträckor på kort tid. Vanligtvis är spricksystemen i kalksten små vilket leder till en liten lagringsförmåga av vatten, vanligtvis några enstaka procent, vilket jämförelsevis innehåller flera hundra gånger mindre vatten än en rullstensås. Detta tillsammans med de tunna jordlager som existerar bidrar till en relativt stor avrinning då de tillgängliga magasinen fylls upp snabbt (Region Gotland, 2016a).

Sudret är inget undantag och även här domineras berggrunden av kalksten och då främst revkalksten, krinoidékalksten och matoporidékalksten men även märgel förekommer lokalt. I denna typ av sten är lokala sprickzoner frekvent påträffade. Det är primärt i dessa sprickor

som grundvattnet på Gotland befinner sig. Sprickorna beter sig ofta anisotropt vilket innebär att vattnet samlas i områden där sprickorna är mer frekvent. Flödet mellan sprickakviferena blir också mer komplext då stor variation kan uppstå. Överlag har Gotland en relativt dålig magasineringsförmåga, vilket även stämmer på Sudret som kan ses i figur 12.

På Sudret består den övre bergrunden av silt, sandsten, lersten och märgel. Den undre delen utgörs primärt av kalksten. Sandsten har ofta en hög porositet på ungefär 30% som möjliggör en hög magasineringsförmåga. Samtidigt förekommer det ofta många spricksystem i sandsten vilket resulterar i en hög hydraulisk konduktivitet som möjliggör större uttag av grundvatten (SGU, 2015). Senaste åren har grunvattenmagasinen på Gotland varit under det normala (SGU, 2019c).

3.2 GMS

Modelleringsmjukvaran som använts under projektet är *Groundwater Modeling System* (GMS). GMS är ett modelleringsprogram designat för att bygga upp och simulera grundvattensystem. För att effektivast modellera grundvattendynamiken används vanligtvis gränssnittet *Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model* (MODFLOW) tillsammans med GMS. MODFLOW tillåter en cellbaserad 3D-simulering av mättade flöden i mark för både jämvikts-&transienta analyser (Harbaugh m. fl., 2000). MODFLOW löser följande partiella differentialekvation, utvecklad från ekvation 1, för att beräkna grundvattenflödet:

$$\frac{\delta}{\delta x}[K_{xx}\frac{\delta h}{\delta x}] + \frac{\delta}{\delta y}[K_{yy}\frac{\delta h}{\delta y}] + \frac{\delta}{\delta z}[K_{zz}\frac{\delta h}{\delta z}] + W = S_s\frac{\delta h}{\delta t} \tag{7}$$

Där

$K_{xx}, K_{yy} och K_{zz}$ är värdena för den hydrauliska konduktiviteten längs x,y och z axlarna $[\frac{m}{s}]$
h är hydrauliska poentialen [m]
W är det volymentriska fluxet per volymenhet representerad av källor och sänkor $[\frac{1}{s}]$
S_s är det den specifika magasinskoefficienten $[\frac{1}{m}]$ t är tiden [s]

3.2.1 MT3DMS

Vid modellering av ämnestransport användes *Modular Transport, 3-Dimensional, Multi-Species model* (MT3DMS). MT3DMS kombinerar tre olika lösningsmetoder för kunna beräkna ämnestransporter under olika förutsättningar med högsta möjliga noggrannhet. MT3DMS är kapabel att simulera advektion, dispersion och kemiska reaktioner. Den huvudsakliga partiella differentialekvation som styr ämnestransporten i MT3DMS är ekvation 8 (Zheng, 1992).

$$\frac{\delta(\theta C^k)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x_i}(\theta D_{i,j}\frac{\delta C^k}{\delta x_j}) - \frac{\delta}{\delta x_i}(\theta \nu_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \tag{8}$$

Där

θ är porositeten [-]
C^k är koncentrationen av ämnet k $[\frac{kg}{m^3}]$
t är tiden [s]
$x_{i,j}$ är avståndet längs respektive axel [m]
$D_{i,j}$ är tensorn för hydrodynamiska dispersioneskoefficienten $[\frac{m^2}{s}]$
ν_i är den linjära porhastigheten $\frac{m}{s}$
q_s är det volymetriska flödet per volymenhet akvifer representerad av källor och sänkor $[\frac{1}{s}]$

3.2.2 SEAWAT

Modellering av saltkoncentrationens effekt på vattnets densitet, vilket inte inkluderas i MT3DMS, genomfördes med hjälp av SEAWAT. SEAWAT beräknar med hjälp av ekvation 9 hur en vätskas densitet spelar in i ett ämnes spridning i mark. Grundvattenstömningen som beräknas med MODFLOW tar med hjälp av SEAWAT hänsyn till hur vattnets densitet förändras vid ämnestransport, under arbetets gång hur saltvattnet transporteras. (Guo m. fl., 2008)

$$\nabla[\rho\frac{\mu_0}{\mu}K_0(\nabla h_0 + \frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\nabla z)] = \rho S_{s,0}\frac{\delta h_0}{\delta t} + \theta\frac{\delta\rho}{\delta C}\frac{\delta C}{\delta t} - \rho_s q_s^{'} \tag{9}$$

Där

ρ_0 är vätskans densitet $[\frac{kg}{m^3}]$ vid referenskoncentration och referenstemperatur
μ är den dynamiska viskositeten $[\frac{kg}{m^3 \cdot s}]$
K_0 är den hydrauliska konduktivitetstensorn för materialet mättat med referensvätskan $[\frac{m}{s}]$
h_0 är den hydrauliska potentialen [m]
$S_{s,0}$ är den specifika magasinskoefficienten $[\frac{1}{m}]$
t är tiden [s]
θ är porositeten [-]
C är koncentrationen salt $[\frac{kg}{m^3}]$
$q_s^{'}$ är en källa eller sänka $[\frac{1}{s}]$ med densiteten ρ_s

4 Metod

För att få en överblick över potentiella modelleringsplatser på Sudret samt undersöka möjliga verktyg för modellering av platsen genomfördes initialt en litteraturstudie. För att effektivast få en insyn i Sudrets förutsättningar och hantera given data bestämdes ArcMap och MATLAB vara det bästa verktyget. Effektivast modelleringsverktyg bestämdes vara GMS.

4.1 Val av plats

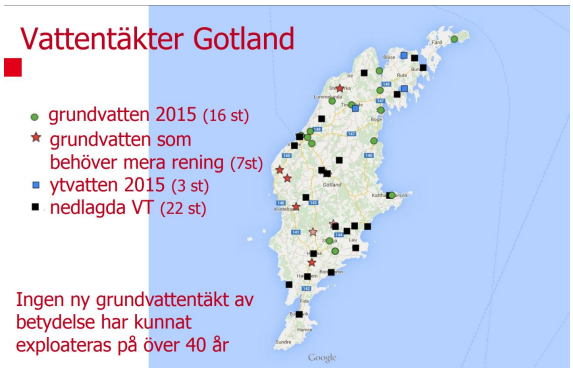
Första utmaningen var att att välja en lämplig plats. Vid val av plats beaktades underlaget för den teoretiska modelleringen samt praktiska möjligheter. För att underlätta detta bestämdes följande kriterier vara av vikt.

- Distans till hav för optimal effekt av pumpning, ur en ekonomisk aspekt är även detta av vikt
- Minimal föroreningspotential, både ur en saltinträngningssynpunkt och avstånd till punktutsläpp
- Tillgång till kvalitativ och kvantitativ platsspecifik data, som grundvattennivåer och markegenskaper
- Typ av berggrund och jordlager för optimal infiltration och vattenlagring
- Naturliga avgränsningar som blir randvillkor i modell t.ex. vattendelare och hav
- Avstånd till vattenskyddsområden

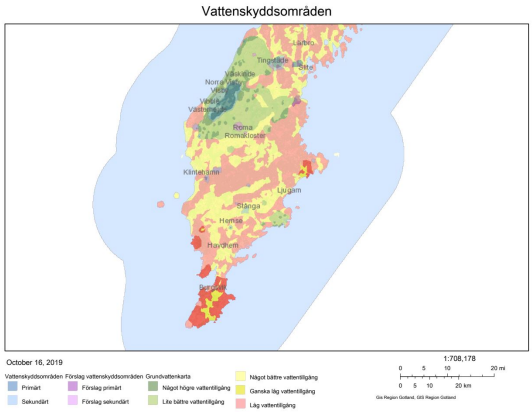
Varje kriterie har undersökts separat för att till sist sammanfattas i slutet av detta avsnitt.

Minimal föroreningspotential

Dricksvattentäkter och vattenskyddsområden har lokaliserats i ett försök att minimera risken för kontaminering av dessa genom saltvatteninträngning, om salt vatten skulle börja pumpas upp. Enligt en undersökning gjord av SGU får majoriteten av de som får kommunalt vatten på Sudret sitt dricksvatten från kommunala reningsverk norrifrån (SGU, 2015). Totalt sett får i genomsnitt 40% av befolkningen på Gotland sitt dricksvatten från enskilda brunnar (Region Gotland, 2016a).

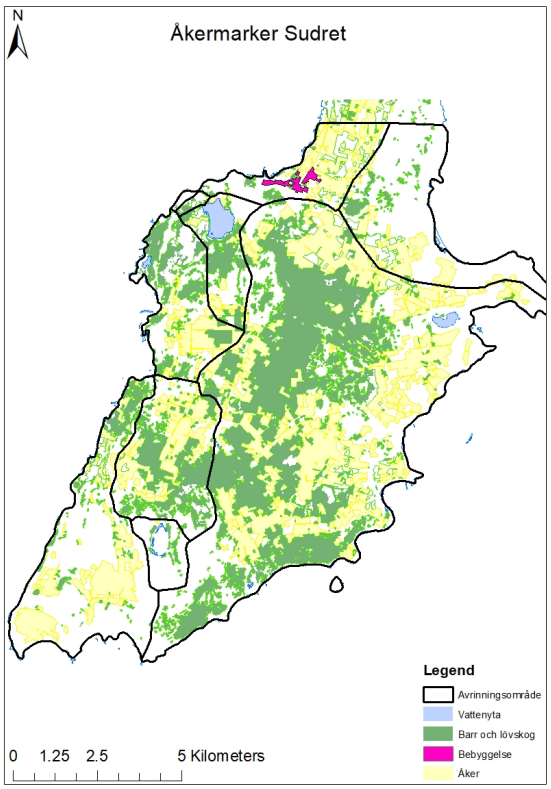


Figur 5: *Vattentäkter på Gotland(Gotland, 2020).*

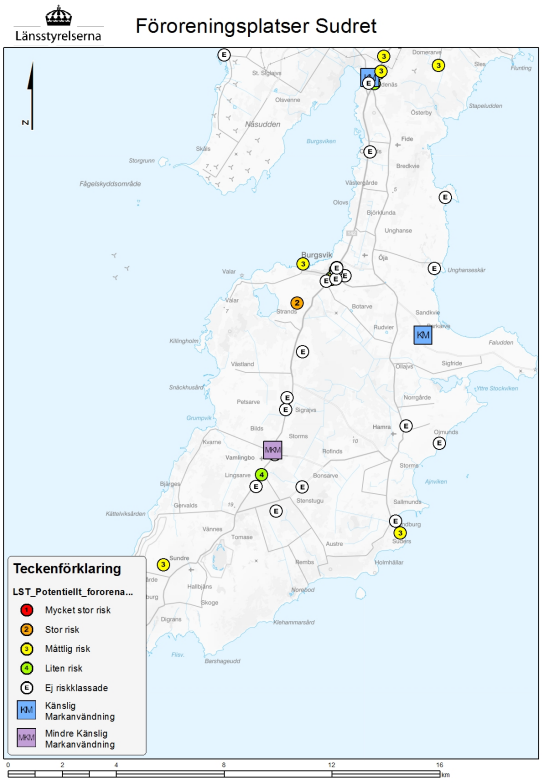


Figur 6: *Vattenskyddsområden på Gotland (Gotland, 2020).*

Enligt figur 5 finns inga vattentäkter av betydande storlek på Sudret. Enligt figur 6 finns heller inga officiella vattenskyddsområden som bör tas särskild hänsyn till på Sudret, se södra delen av Gotland.



Figur 7: *Jordbruk på Sudret. Karta skapad från SLU's terrängkarta (SLU, 2020) och geodatakatalogen (Länsstyrelserna, 2020).*



Figur 8: *Karta över Sudret och misstänkta förorenade områden. Upphovsrätt EBH-kartan.*

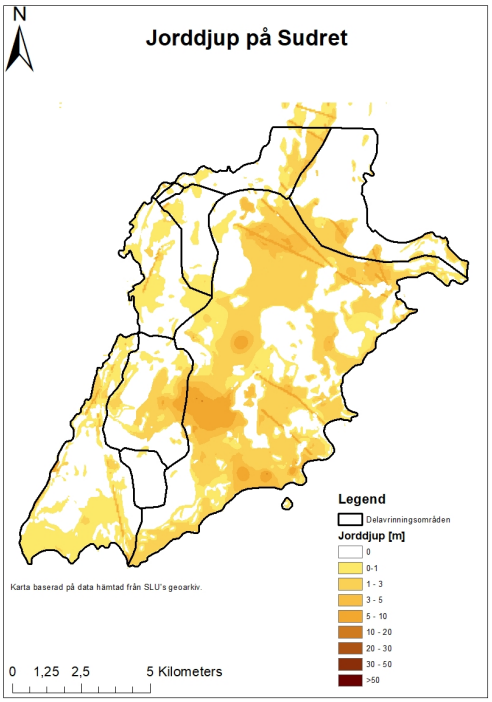
När en brunn grävs bör hänsyn tas till eventuella åkermarker, avlopp och risk för sur

nederbörd då detta kan kontaminera dricksvattnet. Kontamination av dricksvattnet gäller främst ytliga grundvattenuttag, djupare ner i marken agerar berggrunden och jordlagret som en buffert mot dessa ytföroreningar. Denna buffert varierar dock i effektivitet beroende på vilken typ av berggrund som finns, t.ex. agerar mark som har mycket sprickor och låg porositet som en sämre buffert. På Sudret består bergrunden till viss del av sådan typ av berggrund; kalksten och karst vilka har spricksystem där vatten kan färdas långa sträckor på kort tid vilket kan bli ett problem om farliga ämnen släpps ut i marken. I figur 7 ses att det finns en betydande del åkermark på Sudret. Enligt Region Gotland bör ett avstånd mellan brunn till åkermark och/eller avlopp vara minst 50m för att undvika eventuella föroreningar (Region Gotland, 2016b).

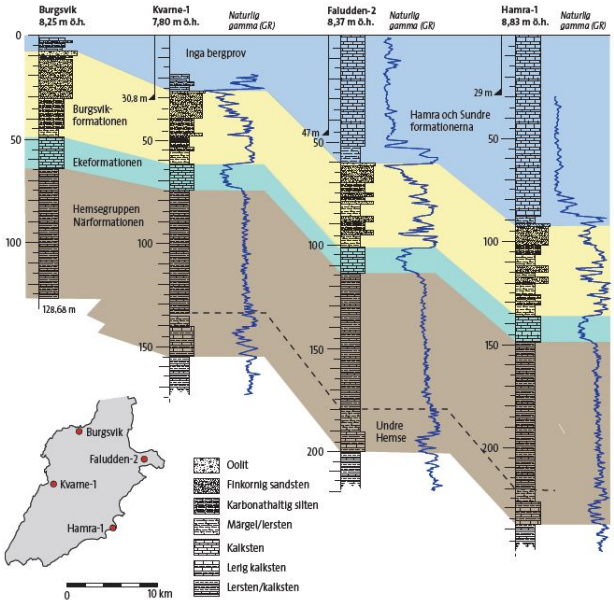
Enligt EBH-kartan, se figur 8, finns det enstaka förorenade punkter att ta hänsyn till vid vattenuttag.

Berggrund och Jordlager

Hur mycket grundvatten som bildas beror till viss del på om bergrunden har ett täckande jordlager eller ej, av vilken tjocklek samt typ av jord. Eftersom jord har en relativt hög konduktivitet bidrar den till att fördela och infiltrera nederbörd till grundvattenmagasin och därmed minska avrinningen. Jordlagren bidrar även till en naturlig rening av det vatten som infilteras (SGU, 2017b).

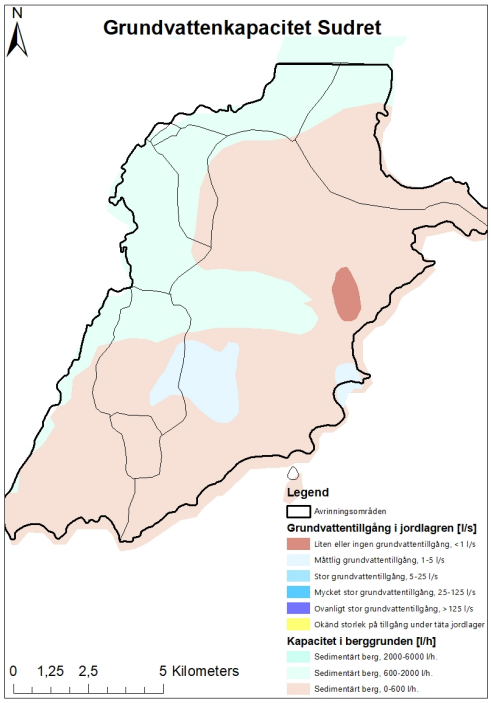


Figur 9: *Jorddjupskarta skapad från SLU's jordartskarta (SLU, 2020) och geodatakatalogen (Länsstyrelserna, 2020).*

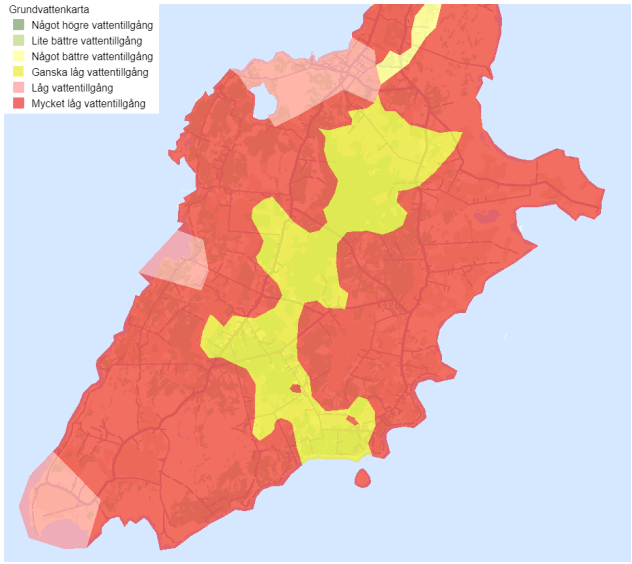


Figur 10: *Översiktlig bild över berggrund för fyra olika borrhål på Sudret. (SGU, 2015)*

Figur 9 visar att de delar av Sudret som har en betydande del jorddjup befinner sig främst i centrala men även östra delarna. Figur 10 visar borrhålsdata från 1919, det finns även nyare borrhålsdata på Sudret i samband med SkyTEM-mätningarna som gjordes 2017 men dessa går inte lika djupt och ger ej samma detaljbeskrivning. Från figur 10 ses en generell trend där det översta lagret består av kalksten som sedan går över i sandsten, därefter kommer ett ytterligare ett lager kalksten som därefter blir en blandning av märgel, lersten och kalksten.



Figur 11: *Uppskattad grundvattenkapacitet i bergrunden på Sudret. Figur skapad från SLU's geoarkiv (SLU, 2020).*

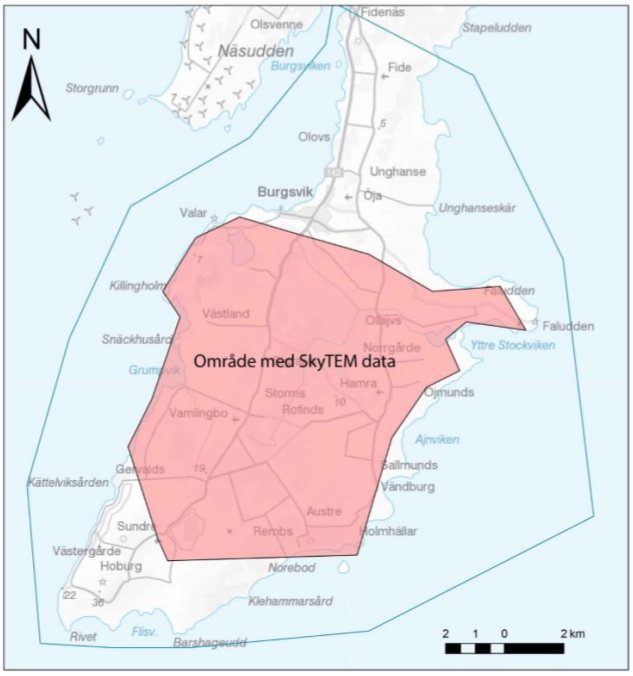


Figur 12: *Vattentillgång på Sudret (Gotland, 2020).*

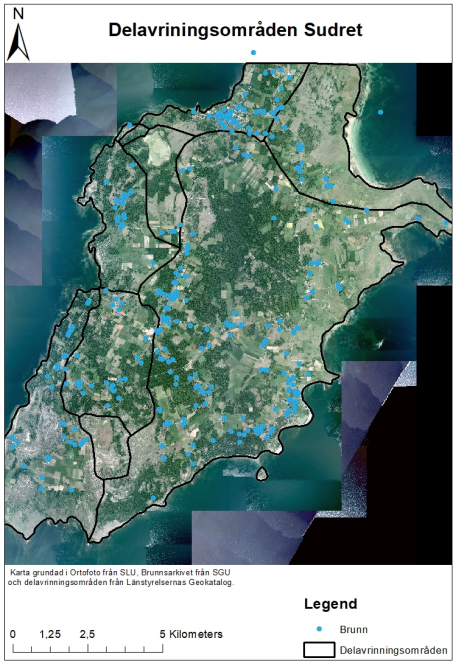
I figur 11 visas den generella grundvattenkapaciteten som högre i de västra delarna av Sudret, grundvattenuttag bör ej överstiga denna kapacitet för att undvika torrpumpning. Enligt figur 12 är vattentillgången som högst i de centrala delarna av Sudret, detta kan möjligtvis kopplas ihop med att det finns ett tjockare jordlager i dessa delar enligt figur 9.

Dataunderlag

Data har främst hämtats från provtagningar på Sudret och Gotland men även data från litteratur har sammanställts från liknande omständigheter.



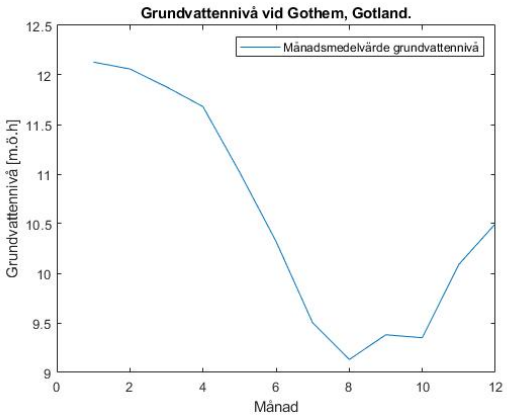
Figur 13: *Område på Sudret med SkyTEM-data. Det röda område är det mest högst noggrannhet.*



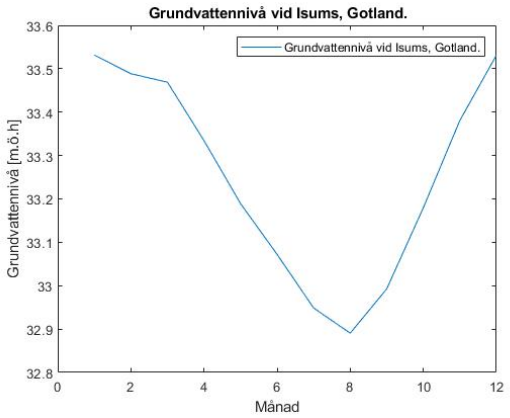
Figur 14: *Avrinningsområden och brunnar på Sudret. Underlag taget från SGU's brunnsarkiv (SGU, 2019a) och geodatakatalogen (Länsstyrelserna, 2020).*

I figur 13 markeras den plats på Sudret där mätningar över geologin har högst noggrannhet och därmed är mest pålitlig. Från Sky-TEM data finns information om typ av berggrund och djup i punktformat, sammanställt utgör det grunden för den geologiska modellen. Även information gällande salt vatten i berggrunden, beräknat genom resistivitet finns att tillgå från Sky-TEMmätningarna.

Figur 14 visar de naturliga avrinningsområden som finns samt de officiellt grävda brunnarna på Sudret. Många av dessa brunnar har mätningar över grundvattennivån från tidpunkten då den grävdes. Från SMHI har data analyserats över grundvattennivåer och hur de varierar under året på två platser på Gotland, det har visualiserats i figur 15 och 16. Från platsen Isums fanns data tillgängligt varje månad från 1990-2018, vilka har medelvärdesbildats i figur 16. Data för plats Gothem fanns tillgängligt under 2018 med mätningar varje dag förutom sista halvan av december vilket troligtvis resulterade i en lägre grundvattennivå den månaden än vad som är realistiskt, även dessa data har medelvärdesbildats för varje månad i figur 15.

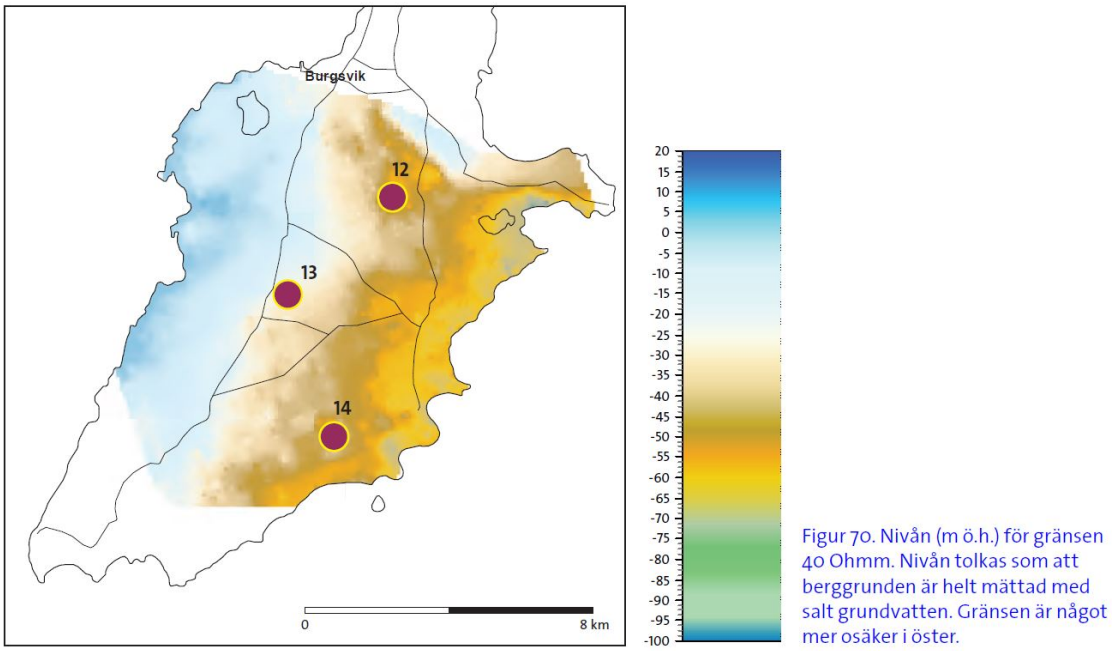


Figur 15: *Grundvattennivå från Gothem Kaupungs, Gotland.*



Figur 16: *Grundvattennivå från Isums, Gotland.*

Förutom data över grundvattennivå behövs även information om hur djupt gränsen mellan sött och salt grundvatten befinner sig i marken. Från tidigare examensarbete har gränsen mellan vattenmassorna modellerats till att ligga vid gränsen mellan kalksten och sandsten (Andersson, 2019), det stämmer väl med tidigare undersökningar som kommit fram till att saltgränsen ligger mellan 20-60 meter ner i marken.



Figur 17: *Figur över djup till saltvattengräns beräknat med hjälp av resistivitet från skyTEM-mätningar. Punkt 12, 13 och 14 motsvarar borrhålsmätningar innehållande information som t.ex. grundvattennivåer.*

Figur 17 visar att saltgränsen ligger ytligare västerut och går sedan djupare österut på Sudret. Det stämmer bra med teorin att saltgränsen ligger någonstans kring skiktet kalksten

och sandsten då denna geologiska skiktning även sluttar i samma riktning med $0.2 - 0.4°$. En överblick på den geologiska lagerföljden kan ses i figur 10. Samma slutsats finns i rapporten *SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2* där grundvattnet ofta kan antas vara salt om man borrar ner till sandstenen (SGU, 2015).

Från tidigare modelleringar av Gotland (SGU, 2017b) framgår det att värden över geohydrologiska paramterar som porositet, hydraulsik konduktivitet, magasinskoefficient, vattenavgivningstal, dispersion och grundvattenbildning måste definieras för en väl fungerande modell.

Tabell 1: *Parametervärden från tidigare modellering på Gotland gjord av SGU (SGU, 2017b)*

Marktyp	K-värde	Grundvattenbildning	Färg i modellfigurerna
Grus	1e-3 $\frac{m}{s}$	225 mm	Grön
Sand	8e-5 $\frac{m}{s}$	100 mm	Orange
Lerig morän	1e-7 $\frac{m}{s}$	30 mm	Ljusblå
Lera	1e-7 $\frac{m}{s}$	15 mm	Gul
Gyttjelera	1e-7 $\frac{m}{s}$	15 mm	Ljusbrun
Organisk Jord	1e-7 $\frac{m}{s}$	30 mm	Mörkbrun
Fyllning	1e-4 $\frac{m}{s}$	100 mm	Grå
Berg	5e-6 $\frac{m}{s}$	15 mm	Mörkblå

Tabell 2: *Parametervärden till grundvattenmodellering av Sudret (Andersson, 2019)*

Material	Hor.K $[\frac{m}{s}]$	Vert.Anis $[(\frac{Kh}{Kv})]$	Magasins-koeff. $[\frac{1}{m}]$	Avg. tal. [-]	Long. disp. [m]	Porositet [-]
Grus	5.8e-4	3	0.000075 (0.0001)	0.24	0.24 (2.1)	0.4
Org. material	6e-5	3	0.00054 (0.02)	0.24	0.24 (2.1)	0.4
Silt	2e-6	3	0.001 (0.001)	0.02	0.24 (2.1)	0.4
Revkalksten	5.8e-6	3	0.00007 (3.67e-6)	0.14	0.24 (2.1)	0.3
Kalksten	4e-7	2	0.00007 (3.67e-6)	0.14	0.24 (2.1)	0.1
Sandsten	4e-8	3	0.00007 (4.5e-6)	0.21	0.24 (2.1)	0.28
Märgel	8e-9	1.67	0.00007 (4.5e-6)	0.1	0.24 (2.1)	0.3
Kalksten djup	4.6e-8	2	e.e3-6 (3.67e-6)	0.14	0.24 (2.1)	0.1
Top layer	2.3e-4	5	0.00007 (0.02)	0.24	0.24 (2.1)	0.3

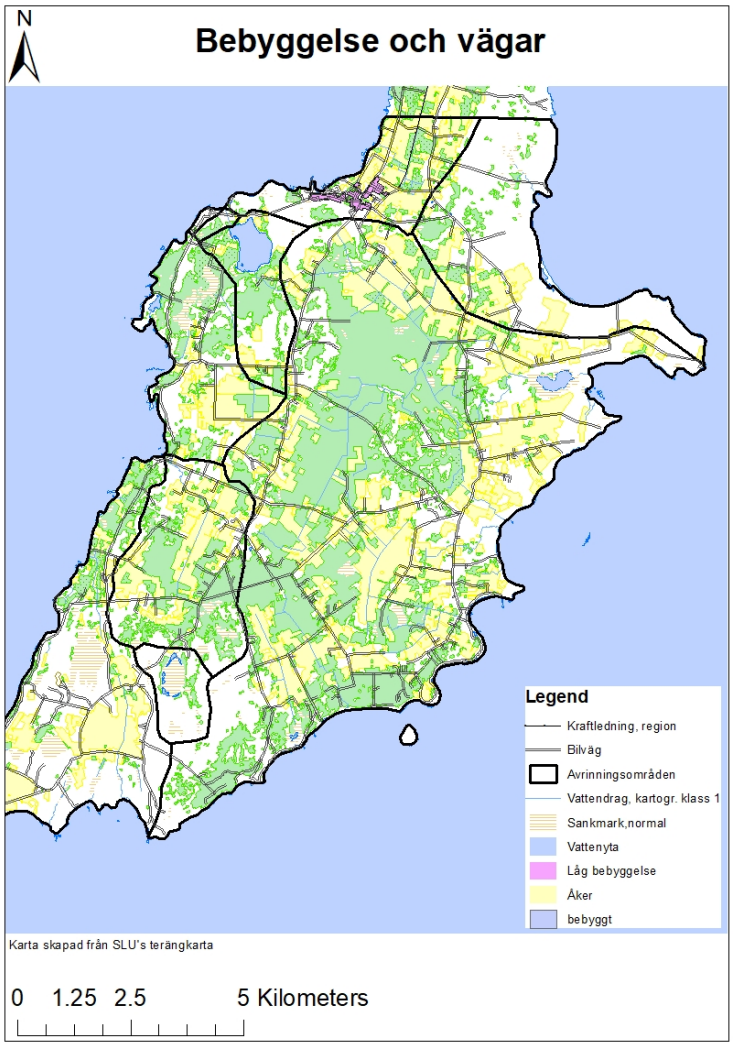
I tabell 1 och 2 finns parametervärden och mätdata från tidigare modelleringar och borrhålsmätningar på andra delar av Gotland som kan vara användabara vid grundvattenmodellering på Sudret då dessa platser har liknande geologiska förutsättningar. Värden inom parentes användes vid testsimuleringen med värden framtagna med alternativmetoder. Förkortningarna i tabell 2 står för följande; Hor.K är den horisontella konduktiviteten, Vert. Anis är den vertikala anisotropin, Avg. tal är vattenavgivningstaletalet och Long. disp är den longitudinella dispersiviteten.

Kostnader

Prisuppgifter från privatpersoner som borrat brunnar i primärt sedimentära bergarter, liknande förutsättningar som på Sudret, för grundvattenuttag varierar från 30.000-70.000kr inklusive pump. Från dessa personer framgår att brunnens kostnad ofta ej bestäms av dess djup utan från typ av berggrund då det är den faktor som har högst påverkan på arbetet. Från offerter via mailkontakt med borrningsföretag kostar en borrning i sedimentär bergart i stockholmsområdet ca 50.000-100.000kr. Att borra i sedimentära bergarter och djupare i bergrunden är ofta mycket billigare än att borra i jordlager då det medför kostnader för att stabilisera jorden kring brunnen (Livsmedelsverket och SGU, 2014). Om det inte rinner tillräckligt med vatten för uttag går det att göra en så kallad spräckning av berget för att öka grundvattenflödet till brunnen. Ett sådant arbete kostar ca 5.000-10.000kr.

SGU har tidigare uppskattat att det går att ta ut ungefär 300-600 $\frac{l}{h}$ ur en brunn på Sudret (SGU, 2015). Enligt figur 11 finns en kapacitet på 0-600 $\frac{l}{h}$ på östra delen av Sudret och 600-2000 $\frac{l}{h}$ på de västra delarna. För denna beräkning antas 450 $\frac{l}{h}$ (7.5 $\frac{l}{min}$).

Om ett önskat flödestryck vid toppen av brunnen antas vara 5 bar, tryckförslusterna antas vara 1.5 bar och pumphöjden antas ligga mellan 50m-120m behövs en pump som kan leverera 7.5 $\frac{l}{min}$ vid tryckfallet 11.5-18.5bar (Lundagrossisten, 2018). Enligt Grundfors katalog över pumpar kostar en pump som uppfyller dessa villkor ungefär 15.000kr-30.000kr beroende på brunnens djup vilket då påverkar tryckfallet som pumpen är designad för (Grundfors, 2019).

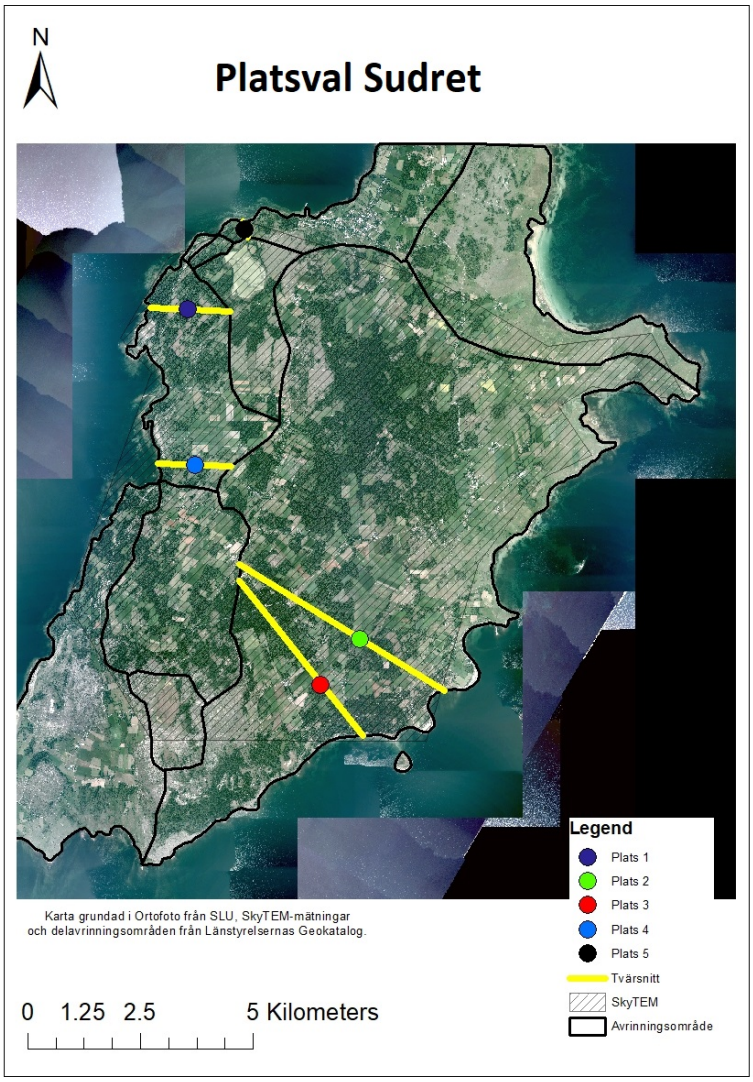


Figur 18: *Figur över vägar, åkermark, bebyggda ytor och våtmarker som bör undvikas ur en ekonomisk aspekt vid placering av vattenledningsrör.*

Efter att brunnen är borrad och pumpen är installerad måste dock vattnet fortfarande transporteras till havet där det släpps ut. För vattentrasport varierar offerter för att anlägga rör i mark mellan 250-2000$\frac{kr}{m}$ beroende på terräng, exklusive rör. Det kan bli betydligt dyrare om grävning sker genom bebyggelse, väg och eller el. En överblock över denna typ av infrastruktur ses i figur 18. Om möjligt kan vattenrör även läggas ovan mark, vilket minskar kosnaden markant. Dimensionering och materialval av rör kan bestämmas med hjälp av publikationerna P83, P110, P98, P92 och P99 från Svenskt vatten (Svenskt vatten, 2019). I dessa går det även att beräkna om det är nödvändigt med en trycksättningspump någonstans längs röret, för att bibehålla ett stabilt flöde till utloppet.

Sammanfattning val av plats

Utifrån den bakgrund som presenterats har fem tvärsnitt valts ut som eventuella modelleringsplatser på Sudret. Alla platser har valts inom områden med mest pålitlig SkyTEM-data och med naturliga avgränsingar till hav och vattendelare enligt figur 13 och 14.



Figur 19: *Figur över de olika valda tvärsnitten på Sudret. Den sträckade arean som heter SkyTEM definierar det approximativa område med SkyTEM-data av minst felmarginal.*

I figur 19 visas fem valda tvärsnitt på Sudret där Plats 1 har valts efter minimal föroreningspåverkan där. Figur 7 och 8 visar att att plats 1 har ett långt avstånd till jordbruk och förorenade platser.

Plats 2 har valts efter dataunderlag. Även om de flesta platsval skulle ha liknande dataunderlag, t.ex. tabell 1 och 2, finns det två olika borrhålsmätningar med data över grundvattennivå och typ av berggrund vid tvärsnittet vid plats 2, mätningarna kan ses som punkt

14 i figur 17 och som *Hamra-1* i figur 10. Utöver detta finns även många brunnar med data över grundvattennivåer från SGU's brunnsarkiv som kan ses i figur 14.

Plats 3 har valts efter typ av mark där det i figur 12 framgår att det finns en ökad vattentillgång vid den valda platsen. På liknande sätt framgår en ökad vattentillgång i jordlagren på samma plats enligt figur 11, detta stämmer väl överens med jordlagrets mäktighet, enligt figur 9, vilket bör öka infiltrationsmöjligheterna. Plats 4 har även den valts utifrån förutsättningar i berggrunden, figur 11 visar en ökad kapacitet i berggrunden vid denna plats vilket påverkar den volym vatten som kan pumpas ut från djupet.

Ytterligare en aspekt som bör beaktas gällande berggrunden är dess geologiska sluttning vilket medför en sluttande gräns mellan sött och salt grundvatten åt samma riktning, se figur 10 och 17. Det skulle kunna komma att påverka en eventuell pumpning negativt genom att saltvatten ,som har högre densitet än sötvatten, från de högre nivåerna västerut på Sudret teoritiskt sett borde röra sig djupare i riktning österut med hjälp av gravitationen och därmed förorena den ökade grundvattenbildningen. Denna effekt borde teoretiskt sett vara mindre längre västerut, närmare plats 4.

Plats 5 har valts efter minimal kostnad där en kort sträcka till havet har beaktats för att minimera kostnaden vid anläggningen av rör då kostnaden troligtvis kan bli stor. Ett försök att undvika vägar, bebyggelse och djupt jordlager har också gjorts utifrån figur 18. Även kort borrdjup placerar plats 5 på den västra delen av Sudret.

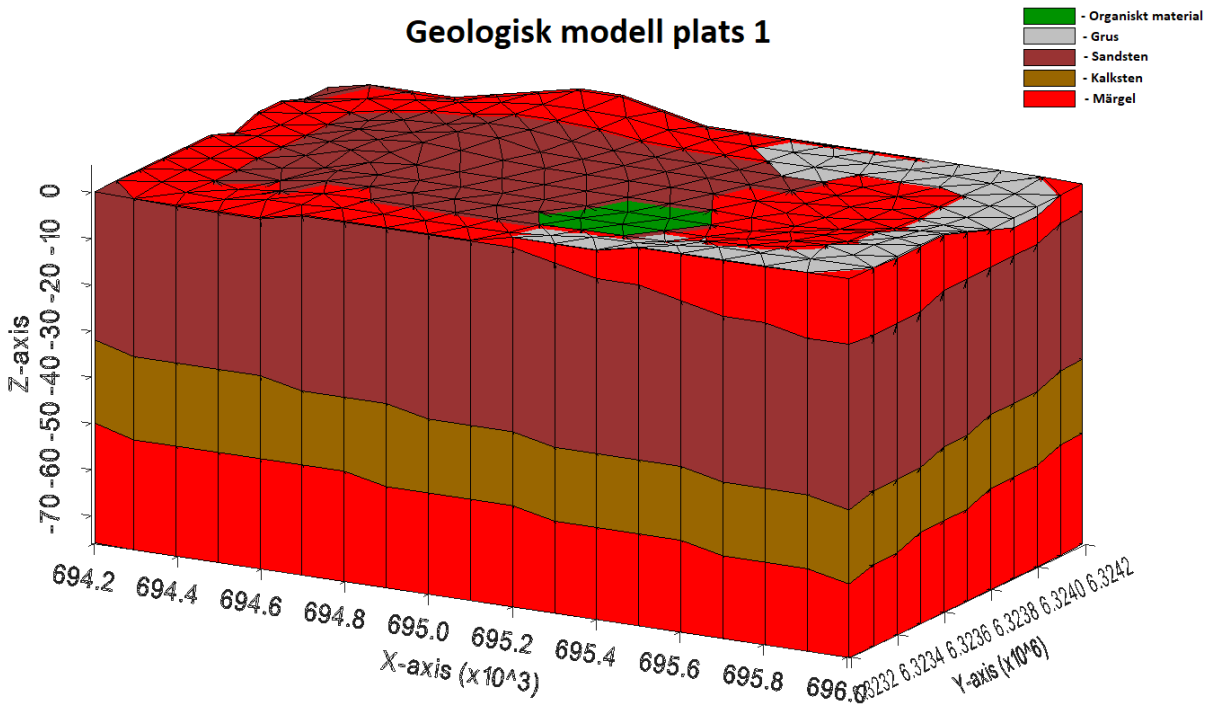
Med det underlag som tagits fram har en bedömning gjorts att modellering kring plats 1 eller plats 2 är mest fördelaktigt, båda dessa platser har olika fördelar och nackdelar. Plats 1 bedöms som mer praktiskt och ekonomiskt fördelaktig med fördelar i berggrund medan plats 2 anses ha bättre tekniskt underlag för modellering. För att undersöka fler platser, få ett bredare underlag och analysera känsligheten i parametrar gjordes valet att modellera både plats 1 och plats 2.

4.2 Geologisk modell

För att skapa en grundvattenmodell måste först en geologisk modell skapas. Underlaget till den geologiska modellen var mätningar genomförda av SGU år 2015 med hjälp av SkyTEM-metoden (SGU, 2015). Informationen från mätningarna resulterade i data varannan meter i djupled med tillhörande bergart från markytan ner till -76 m.ö.h. Mätdata över berggrund gjordes med 100m avstånd från varandra i sidoled. Information från mätningarna sorterades och omarbetades i MATLAB för att kunna implementeras visuellt i ArcMap. Relevant data definierades sedan kring den utvalda platsen, se figur 19, med hjälp av ortofoton och verktyg i ArcMap. Utvald data exporterades sedan tillbaka till MATLAB där punkterna tilldelades namn och attribut för att bli kompatibelt med GMS.

För att på ett effektivt sätt kunna arbeta med mätningarna och skapa en geologisk modell i GMS genomfördes ett konceptuellt tillvägagångssätt. Med hjälp av sorterad SkyTEM-data över platsen skapades virtuella borrhål i modellen. Borrhålen användes för att interpolera

horisonter och ytor i modellen som definierade de olika bergrunderna och deras förekomst. Dessa ytor låg till grund för att extrapolera data till den slutliga solida geologiska modellen som kan ses i figur 20.



Figur 20: *Den geologiska modellen på plats 1. Här illustreras de olika geologiska lager och hur de förhåller sig till varandra. Enheten längs axlarna är i meter, därav ses även att modellen är utdragen oproportionerligt i höjdled (Z-led) för tydligare visualisering av de geologiska lagren i berggrunden. Vänster i figuren är västerut längs plats 1, se figur 19.*

4.3 Grundvattenmodell 2D

För att skapa grundvattenmodellen i GMS användes MODFLOW. Ett rutnät skapades över den konceptuella geologiska modellen och eftersom mätningarna var i storleken 100mx100mx2m får cellerna i rutnätet ej överstiga den dimensionen för att inte tappa relavant information. Rutnätet som skapades längs det valda tvärsnittet fick cellstorleken 10mx1mx2m (X, Y, Z) för att bäst efterlikna en 2D-modell med hög upplösning. Eftersom den 2-dimensionella modellen definierades med bredden 1m innebär det vidare att resultaten måste ses som per meter akvifersbredd. Resultat av pumpning blir även per meter horisontell brunn vinkelrät mot tvärsnittet.

För att simulera dynamiken i grundvattnet skapades en MODFLOW-modell genom att integrera de olika attributen från den solida geologiska modellen till det skapade rutnätet. I MODFLOW valdes de olika nödvändiga tilläggen; *RCH* (*Recharge*) för grundvattenbildningen, *LPF* (*Layer Propery Flow)* för materialparametrarna, *DRAIN* för diken och *GHB*

(*General Head Boundry*) för randvillkoren.

I *LPF*-paketet angavs de olika modellparametrarna för varje bergart, se tabell 3 och 4 för parametrar och dess slutgiltiga numeriska värden.

Grundvattenbildningen antogs vara unik för respektive bergrund och definierads därmed därefter. Grundvattenbildningen bestämdes bland annat från tidigare grundvattenmodellering på Gotland (SGU, 2017b), dessa siffror kan ses i tabell 1. Även en rapport gällande sveriges generella grundvattenbildning (SGU, 2017a) och en rapport om grundvattenmodellering vid File Hajdar på Gotland har använts som underlag där grundvattenbildning beräknats med hjälp av nettonederbörden på Gotland (Golder Associates, 2017a).

Den *horisontella hydrauliska konduktiviteten* har primärt tagits från slugmätningar gjorda på norra delen av Gotland inför en tidigare grundvattenmodellering (Golder Associates, 2017b). Värden har även jämförts med de från ett tidigare modelleringsarbe på Sudret där information om hydrualisk konduktivitet uppskattats med hjälp av expertbedömningar av professorer (Andersson, 2019).

Den *vertikala hydrauliska konduktiviteten* har definierats i förhållande till den horisontella konduktiviteten. Efterforskningar resulterade endast i kunskapen att den vertikala konduktiviteten oftast är lägre än den horisontella. Värden har bland annat tagits från undersökningar om strukturförhållanden på hydraulisk konduktivitet (Lind och Nyborg, 1986).

Värden på *magasinskoefficienten* har beräknats med hjälp av 6 där värden på bergartens kompressibilitet tagits från tidigare undersökningar (Freeze och Cherry, 1979). Även pumptester på Gotland inför tidigare grundvattenmodellering (Golder Associates, 2017b) har jämförts med beräknade värden för ett noggrannare resultat.

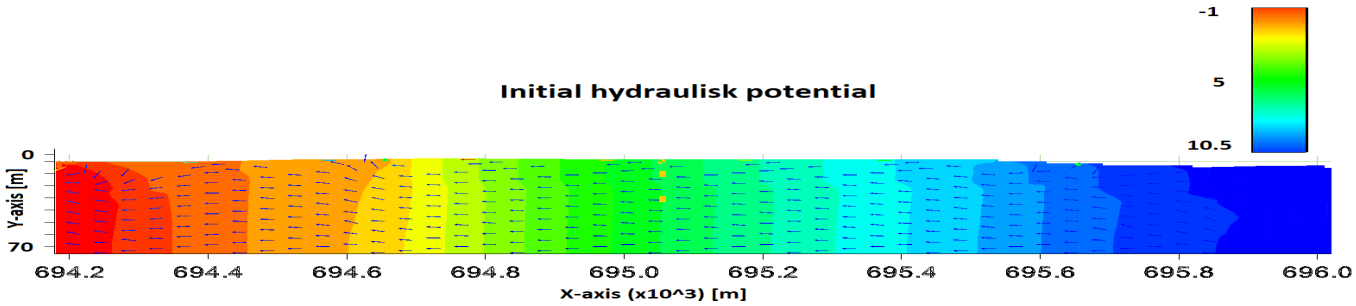
Vattenavgivningstalet har bestämts från enbart litteraturvärden från tidigare noggranna undersökningar för specifika material (C, 1983) (Morris och Johnson, 1966).

Den *longitudinella dispersiviteten* bestämdes från tidigare fältundersökningar i liknande berggrunder (Bjerg, 2008) tillsammans med värden från tidigare modellering av Sudrets grundvatten (Andersson, 2019)

Porositeten har bestämts både från tolkningar av borrhålsmätningar på Sudret (Sällström, 2017) samt litteraturvärden från experiment för olika marktyper (Morris och Johnson, 1966)

Randvillkor definierades vid vattendelare där inget flöde sker och hav där en konstant hydraulisk potential uppstår. Diken för avledning av ytvatten bestämdes ligga kring bilvägar som korsade tvärsnittet och definierades genom *Drain*-tillägget vilka kalibrerades genom att kontrollera modellens totala flödesbudget och hydrauliska potential. Enligt tidigare studier (SGU, 2017b) och jorddjupskartan i figur 9 ansågs det rimligt att ansätta ett 2m tjock jordlager ovanför bergrunden som täckte hela tvärsnittet för att öka infiltration och flöde vid markytan.

För att uppnå en realistisk hydraulisk potential itererades rimliga värdeskombinationer, för hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning, manuellt och kalibrerades sedan mot grundvattennivåer tagna från SGU's brunnsarkiv (SGU, 2019a) och borrhålsmätningar som kan ses i figur 17. För att nå en stabil initial hydraulisk potential i marken gjordes en steady-state simulering, dvs ett resultat där tidsberoende parametrar ej längre har en påverkan, där resultatet användes som initialvillkor för simulering av djupet till saltvattnet.

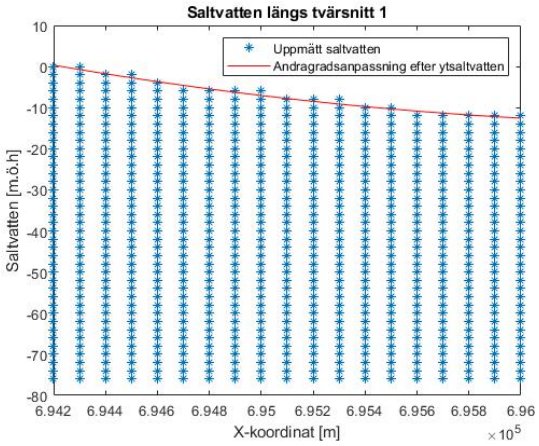


Figur 21: *Slutgiltig hydraulisk potential vid plats 1 efter steady state MODFLOW-simulering. Detta var den initiala hydrauliska potentialen vid simulering av gränsen mellan salt och sött grundvatten.*

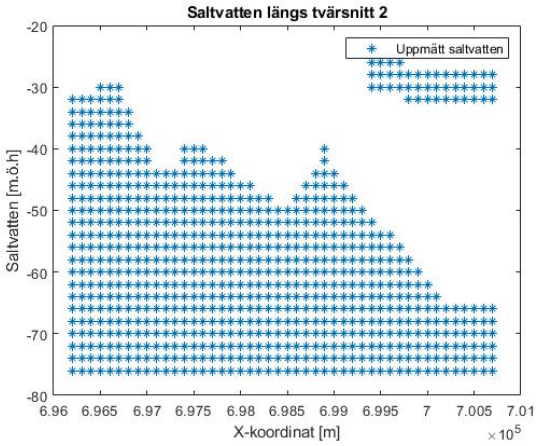
4.4 Simulering av gräns mellan sött och salt grundvatten

För att simulera ämnestransport, i detta fall saltvatten, användes grundvattenlösningssimulatorn *MT3DMS*. Samtidigt fanns behovet av att beskriva de densitetsförändringar som sker när det gäller blandning av salt och sött vatten, den dynamiken simulerades med hjälp av den densitetsvarierande grundvattensimulatorn *SEAWAT*.

Vid simulering av gränsen mellan vattenmassorna vid de valda områdena antogs initialt alla celler vara fyllda med saltvatten som sedan under väldigt lång tid fyllts med sötvatten med hjälp av grundvattenbildningen då landmassan långsamt stigit ovanför havsytan. Enligt tidigare mätningar bestämdes den initiala saltvattenkoncentrationen till 8 $\frac{kg}{m^3}$ (NE, 2019). För att uppnå en stabil och realistisk gräns mellan salt-&sötvattnet simulerades dynamiken under mycket lång tid, mer specifikt 1000år med 100tidsteg. För att efterlikna vattenbalansen synlig i figur 3 delades varje år upp i två perioder, en transiet simulering, där grundvattenbildning endast inträffade under ena perioden som representerade återhämtningsperioden september t.o.m februari.

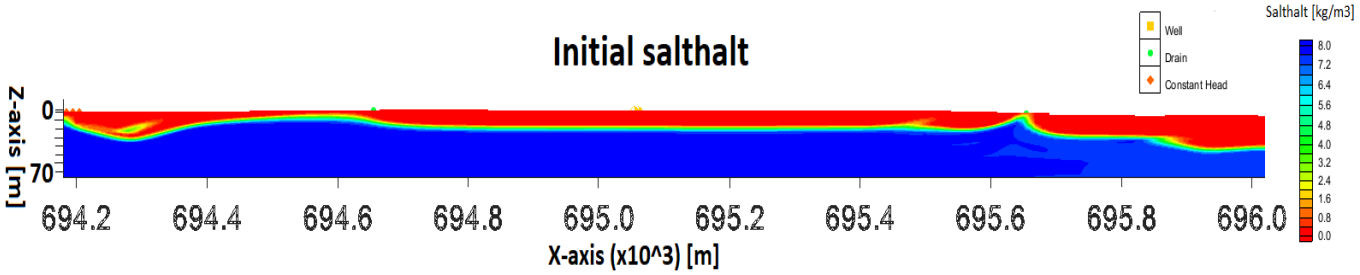


Figur 22: *Uppmätt nivå gräns mellan sött och salt vatten vid plats 1 med SKY-TEM metoden. En andragradsanpassning har gjorts längs gränsen mellan sött och salt grundvatten för att lättare kunna se en tydlig sammanhängande saltgräns. Här ses gränsen till Östersjön till vänster i figuren.*



Figur 23: *Uppmätt nivå gräns mellan sött och salt vatten vid plats 2 med SKY-TEM metoden. Ingen anpassning av ytan till det salta vattnet har gjorts då detta dessa mätningar anses som orealistiska och därmed relativt opålitliga för kalibrering. Här ses gränsen till Östersjön till höger i figuren.*

Djupet till saltvattnet kalibrerades mot angivna djup från Sky-TEM mätningar, figur 22 och 23, och tidigare undersökningar genom att manuellt göra små ändringar av främst hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildningen. Detta visade sig vara en tidskrävande iterativ process då gränsen mellan sött och salt vatten var känslig mot små förändringar av parametrar och varje simulering tog approximativt ett halft dygn. Även den initiala hydrualiska potentialen var tvungen att återskapas vid varje parameterförändring. På grund av processkraft kunde maximalt två SEAWAT-simuleringar köras parallellt. Den slutgiltiga positionen för gränsen mellan sött och salt grundvatten, efter 1000år, användes sedan som initialvillkor vid simulering av pumpning av grundvatten och visas i figur 24.



Figur 24: *Slutgiltig stabiliserad gräns mellan sött och salt grundvatten efter 1000-års simulering, kalibrerad efter figur 22. Vid ungefär* $695.7 \cdot 10^3 m$ *på X-axeln ses en uppgång av saltvatten, det sker på grund av ett dike vid denna position. Denna saltkoncentration användes som initial salthalt vid pumpsimuleringarna.*

För att kalibrera variationen i grundvattennivåerna gjordes försök att efterlikna variationerna synliga i figur 15 och 16, det gjordes genom att variera grundvattenbildningen, avrinningen i diken och den hydrauliska konduktiviteten manuellt. Faktiska grundvattennivåer försökte efterliknas enstaka mätningar från SGU's brunnsarkiv, (SGU, 2019a), och borrhålen synliga i figur 17 på liknande sätt. Kalibreringen visade sig vara komplex och tidskonsumernade, för mer om detta se avsnitt 6, då variablerna även korrelerar starkt med position av den initiala gränsen mellan sött och salt vatten och även den initiala hydrauliska potentialen vilka då behövde återskapas.

4.5 Slutgiltiga parameterval

För att få en ökad förståelse och en bredare resultatgrund att gå vidare med testades två olika parameterscenarion på de två olika platserna, ett med högre grundvattenbildning och ett med lägre, alla med värden kring vad som bestämts vara mest tillförlitligt. Plats 2 bestämdes ur en geologisk synpunkt vara det område med troligtvis högst grundvattenbildning eftersom dessa delar av Sudret har ett relativt tjockt jordlager som kan ses i figur 9 (SGU, 2017b). Därav tilldelades plats 2 därför scenariot med högre grundvattenbildning, vilket korresponderade mot en högre horisontell hydraulisk konduktivitet för att nå den uppmätta saltvattengränsen och en realistisk hydraulisk potential. På liknande sätt korresponderar det scenario med lägre grundvattenbildning mot lägre konduktivtet. Nedan presenteras de olika värdena för de två scenariona för respektive plats.

I tabell 3 och 4 ses de slutgiltigt valda parametrarna för plats 1 respektive plats 2. *Kh* är den horisontella konduktiviteten medan *Kv* är den vertikala konduktiviteten, den fjärde kolonnen i tabellerna ovan är kvoten mellan dessa. Grundvattenbildningens avsaknad för vissa bergarter och jordar beror på att modellen endast bildar grundvatten vid den högsta aktiva, ej uttorkade, cellen och erfodrades ej grundvattenbildningen för alla bergarter.

Tabell 3: *Slutgiltigt valda numeriska värden för samtliga parametrar för respektive bergrund vid plats 1. Vid plats 1 användes lägre värden för grundvattenbildning och horisontell hydraulisk konduktivitet.*

Geologiskt lager	Grundvatten-bildning $[\frac{mm}{år}]$	Kh $[\frac{m}{s}]$	$\frac{Kh}{Kv}$ [-]	Magasins-koeff. $[\frac{1}{m}]$	Avgivnings-tal [-]	Long. disp. [m]	Porositet [-]
Sandsten	40	8e-7	3	9.8e-4	0.22	3	0.28
Kalksten	-	3e-7	2	9.9e-5	0.18	3	0.14
Märgel	30	5e-8	2.5	1.1e-5	0.14	3	0.26
Grus	60	9e-6	3	9.9e-5	0.19	3	0.32
Jord	-	1.6e-5	5	6e-5	0.3	3	0.30

Tabell 4: *Slutgiltigt valda numeriska värden för samtliga parametrar för respektive bergrund vid plats 2. Vid plats 2 användes högre värden för grundvattenbildning och hydraulisk konduktivitet.*

Geologiskt lager	Grundvatten-bildning [$\frac{mm}{år}$]	Kh [$\frac{m}{s}$]	$\frac{Kh}{Kv}$ [-]	Magasins-koeff. [$\frac{1}{m}$]	Avgivnings-tal [-]	Long. disp. [m]	Porositet [-]
Sandsten	-	6e-6	5.2	9.8e-4	0.22	3	0.28
Kalksten	80	8e-6	5	9.9e-5	0.18	3	0.14
Märgel	-	1e-6	3	1.1e-5	0.14	3	0.26
Silt	50	1e-5	1.9	5e-5	0.2	3	0.26
Organiskt	150	6e-5	1	5e-5	0.3	3	0.32
Grus	225	7.5e-5	1.8	9.9e-5	0.19	3	0.32
Jord	-	9.5e-5	1.9	5e-5	0.3	3	0.30
Revkalksten	100	9e-6	3	6e-5	0.25	3	0.20

4.6 Uttag av grundvatten

Vid uttag av saltvatten skapades pumpningsbrunnar med hjälp av tillägget *Wells* där det går att definiera ett djup för pumpning och dess flöde. För att kunna testa om det gick att öka grundvattenbildningen under återhämtningsperioden gjordes det även här en transient körning. För att göra transienta körningar skrevs ett script i *MATLAB* som skapade textdocument innehållande pumpflöden, grundvattenbildning och simuleringstider vilka kunde läsas in i GMS inför varje simulering.

Det antas att de huvudusakliga sötvattenuttagen sker på sommaren, medan det under vinterhalvåret finns ett överskott av nederbörd vilket i teorin möjliggör artificiellt ökad grundvattenbildning. Det simuleras genom att pumpa upp sött grundvatten under sommarhalvåret, April-September. Den andra halvan av året, Oktober-Mars, sker inget sötvattenuttag men istället görs ett uttag av salt grundvatten för att öka nybildningen av sött grundvatten. Det är även endast under andra halvan av året, Oktober-Mars, som det antas ske grundvattenbildning i enlighet med figur 3

Uttaget av sött grundvatten sker i akviferens övre del, helst så långt ovanför gränsen mellan sött och salt grundvatten som möjligt för att undvika att salt grundvatten tränger in men tillräckligt djupt för att möjliggöra önskat vattenuttag. Saltvattenuttaget sker djupare ner i berggrunden, under gränsen mellan vattenmassorna inom det ytligaste geologiska lager där saltvatten finns.

Vid definierande av brunnens djup beaktades alltså både avstånd till gränsen mellan sött och salt vatten samt de geologiska förutsättningarna. Vid plats 1 definierades sötvattenpumpens intag vid -11 m.ö.h (-13 m.u.m) vilket var ≈5m ovanför gränsen mellan sött och salt vatten. Saltvattenpumpen placerades 14m under samma gräns på -30 m.ö.h (-32 m.u.m). Då sandsten övergår till kalksten vid -32 m.ö.h och sandsten anses som den prominenta vattenlagringsbergrunden placerades saltvattenpumpen precis här.

Vid plats 2 var den geologiska lagerföljden destomer varierande och komplex och därav placerades uttagspumparna primärt efter gränsens mellan sött och salt grundvatten. Sötvattenpumpen definierades ≈10m ovanför gränsen vid -28 m.ö.h (-35 m.u.m) och saltvattenuttaget definierades ≈16m under gränsen vid -50 m.ö.h (-59 m.u.m)

För att bäst kunna identifiera om det gick att hitta ett optimalt samband mellan uttagen och därmed maximera möjligheterna för ett ökat sötvattenuttag under sommarhalvåret simulerades flera olika kombinationer av pumpflöden, se tabell 5, 6, 7 och 8 för exakta tester. Simuleringstiden för pumpning var 50 år, detta för att kunna undersöka hur dynamiken ändras på sikt men samtidigt hållas inom en rimlig tidsram.

Tabell 5: *Kombinationer av salt samt sött pumpflöde vid transient simulering vid plats 1. Dessa simuleringar användes för att undersöka koncentrationsförändringar i uttagsvattnet.*

sötvatten $[\frac{m^3}{år}]$	5	15	25	50	65	75	100
	0	0	0	0	0	0	0
	-	5	5	5	15	15	15
Salt vatten $[\frac{m^3}{år}]$	-	-	15	15	25	25	25
	-	-	-	25	50	50	50

Tabell 6: *Kombinationer av salt samt sött pumpvattenflöde vid transient pumpning vid plats 2. Dessa simuleringar användes för att undersöka koncentrationsförändringar i uttagsvattnet.*

sötvatten $[\frac{m^3}{år}]$	150							
Salt vatten $[\frac{m^3}{år}]$	0	15	25	35	50	65	75	100

Tabell 7: *Testade kombinationer av uttagsflöden inför utredning av förändrad volym sött vatten vid plats 1.*

sötvatten $[\frac{m^3}{år}]$	Salt vatten $[\frac{m^3}{år}]$									
0	0	5	10	15	20	25	35	50	65	75
50	0	5	10	15	20	25	35	50	65	

Tabell 8: *Testade kombinationer av uttagsflöden inför utredning av förändrad volym sött vatten vid plats 2.*

sötvatten $[\frac{m^3}{år}]$	Salt vatten $[\frac{m^3}{år}]$										
0	0	5	10	15	20	25	35	50	65	75	100
75	0	5	10	15	20	25	35	50	65	75	100

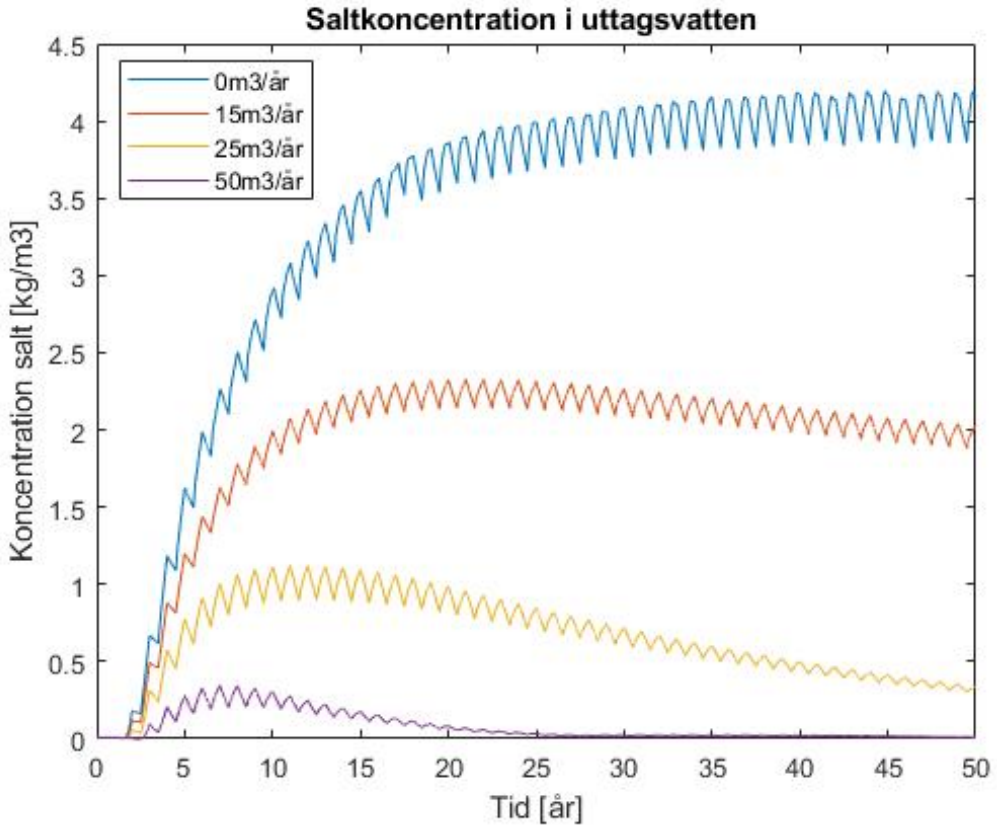
Alla flöden i tabell 5, 6, 7 och 8 har valts inom gränser som definierats av vad modellen har klarat av att simulera. Den övre gränsen för flöden har begränsats när modellen ej har konvergerat på grund av uttorkade celler då pumpflöden varit för stora. Den undre gränsen för testade flöden har bestämts utifrån vad som gett försumbara resultat.

I tabell 5 och 6 presenteras de undersökta pumpflödeskomibnationer som stod till grund för undersökan av saltvatteninträngningens effekt. På grund av tidsbrist kunde endast ett sötvattenflöde testas på plats 2. Koncentration salt har noterats vid den cell där sötvattenuttag skett vid 1 år, 10 år, 25 år och 50 år för varje kombination av pumpflöden. Tid för saltvatteninträngning, vilket definerats som tiden då vatten med koncentration större än $1\frac{kg}{m^3}$ nått pumpen, har även observerats för varje kombination av pumpflöde.

I tabell 7 och 8 visas de testade kombinationer som stod till grund för analys av ökad volym sötvatten. Grundidéen var att testa två olika scenarior, ett försök som representerar utökandet ett opåverkat grundvattenmagasin och ett försök vilket representerar utökandet av ett antropogen påverkat grundvattenmagasin. Genom att testa flera olika uttagsflöden av salt grundvatten var förhoppningen att kunna påvisa en trend eller samband i uttag och ökad grundvattenmagasinering. Vid scenariot med sötvattenuttag för plats 1, tabell 7, sker saltvatteninträngning vilket kom att påverka resultaten. Ingen saltvatteninträngning sker vid plats 2. Ytterligare en effekt som noterades var inträngningen av sötvatten i saltvattenuttaget vilket benämns som sötvatteninträngning. Sötvatteninträngning förekom i höga, relativt sett, saltvattenuttag. För att beräkna den ökade volymen sötvatten har volymen berggrund innehållande sötvatten beräknats vid 1 år, 10 år, 25 år och 50 år för varje pumpkombination. För plats 1 och plats 2 har en porositet bestämts för den sötvattenfyllda volym berggrund med hänsyn till typ av bergart och jordlager. Då berggrunden med sött vatten vid plats 1 endast bestod av sandsten antogs prositeten för sandsten på 0.28. Vid plats 2 blev osäkerheten större då berggrunden bestod av flera olika material och en genomsnittlig porositet uppskattades till 0.22. För att minimera osäkerhet i modellresultaten har den naturliga ökningen, då inget uttag av vatten sker, av grundvattenmagasinet subtraherats från varje tidssteg. En jämförelse mellan uttag av salt grundvatten och ökning av volymen sött grundvatten har verkställts genom att beräkna kvoten mellan dessa två. Vid beräkning av kvoten måste hänsyn tas till att det endast extraheras salt grundvatten med ett halvårs intervall.

5 Resultat

Nedan presenteras simuleringsresultat för plats 1 och plats 2. I den första figuren visas fyra kombinationer av pumpningar, alla med ett sötvattenuttag på 65 $\frac{m^3}{år}$ men med varierande saltvattenuttag. Dessa illustrerar ett fenomen som uppstår i samtliga simuleringar där en tydlig saltinträngning sker och därför anses det som representativt att endast presentera sambandet för ett sötvattenflöde. Uttagsflödet 65 $\frac{m^3}{år}$ valdes då det är en tydlig visuell representation av fenomenet.



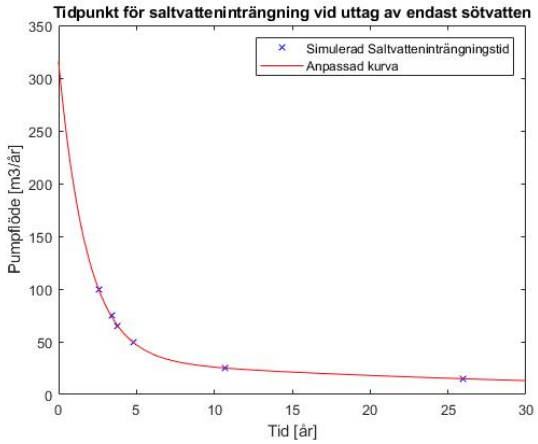
Figur 25: *Saltkoncentration över tid i det söta uttagsvattnet. Uttagsflödet av sötvatten är i alla fyra simuleringar 65$\frac{m^3}{år}$ medan saltvattenuttaget förändras.*

Figur 25 visar hur koncentrationen av salt ändras med tiden vid uttagbrunnen vid plats 1. Figur 25 visar hur saltkoncentrationen i uttagsvattnet förändras med tiden då det endast finns ett sötvattenuttag, saltkoncentrationens generella trend ökar och går sedan mot en jämviktskoncentration. I alla fyra simuleringar finns även lokala effekter varje halvår som motsvaras av återhämtningsperiodens grundvattenbildning som tillfälligt motverkar saltinträngningen. När saltvattenuttaget ökas till 15 $\frac{m^3}{år}$ visas hur saltkoncentrationen i uttagsvattnet ökar långsammare, når en maximal saltkoncentration och avtar sedan marginellt. När saltvattenuttaget ökats ytterligare, till 25 $\frac{m^3}{år}$, ökar koncentrationen av salt ännu fortare än tidigare och avtar nu tydligt. Figur 25 illustrerar även ett stort relativt saltvattenuttag på 50

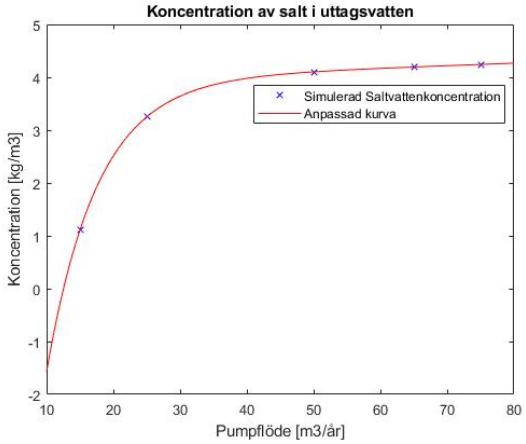
$\frac{m^3}{år}$, där saltkoncentration ökar och bildar en maximipunkt som sedan avtar snabbt för att gå mot en jämviktskoncentration. Vid ett saltvattenuttag på 50 $\frac{m^3}{år}$ är koncentrationen salt aldrig över 1 $\frac{kg}{m^3}$ vilket är den här definierade gränsen för salt vatten, det innebär alltså att saltinträngning undviks. Det visas tydligt hur den maximala koncentrationen salt minskar med ökat saltvattenuttag, vid tillräckligt stort uttag av saltvatten fås ett lågt maxvärde för saltkoncentrationen ($<1\frac{kg}{m^3}$).

5.1 Plats 1

Figur 26 visar hur tidpunkten för saltinträngning ändras med endast ett sött extraktionsflöde, en asymptotiskt avtagande trend är synlig där tidpunkten för inträngning går mot oändligheten när uttagsflödet minskas. Figur 27 visar hur den maximala koncentrationen förändras i uttagsvattnet med endast sötvattenuttag, initialt snabbt ökande koncentration som sedan går mot en asymptot kring 4.4 $\frac{kg}{m^3}$.

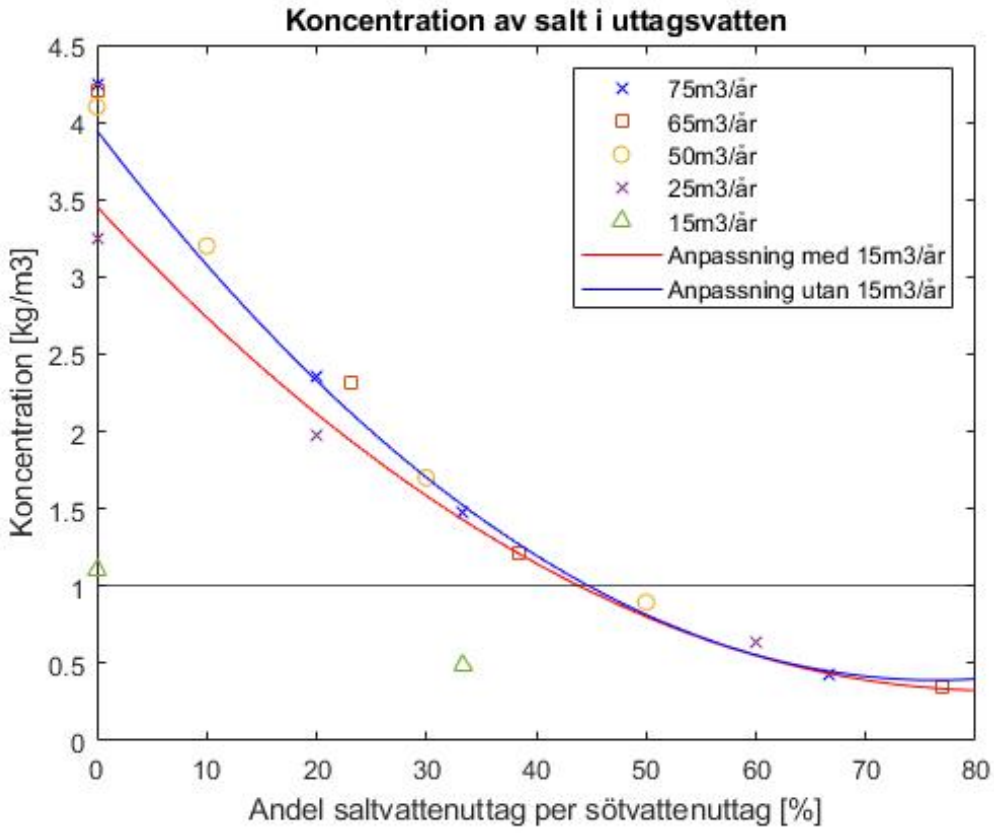


Figur 26: *Tid för saltvatteninträngning vid olika vattenuttag av endast sötvatten vid plats 1. Inget saltvattenuttag förekommer, det vill säga att scenariot efterliknar hur ett normalt uttag ur en brunn skulle påverka tiden för saltinträngning. Saltvatteninträngning har definierats till 1 $\frac{kg}{m^3}$ salt i uttagsvattnet enligt avsnitt 3.1.*



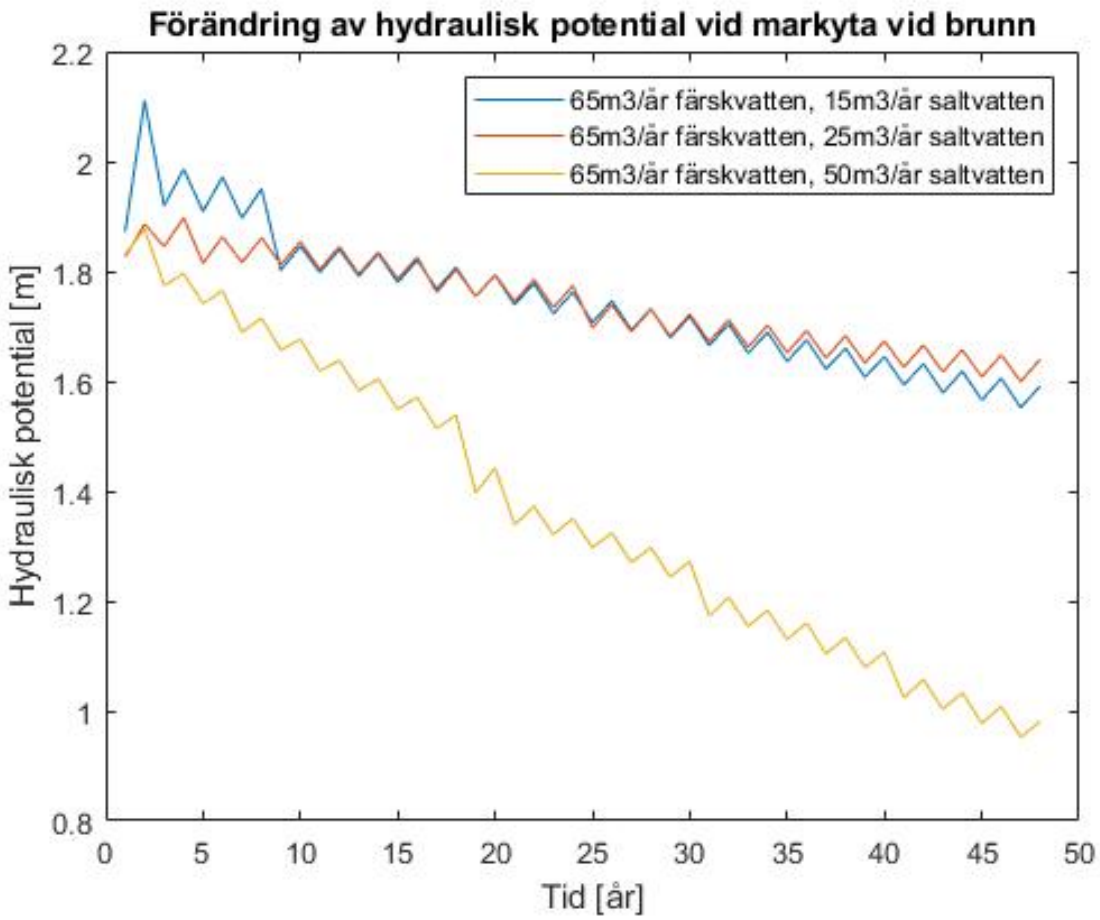
Figur 27: *Maximala saltkoncentrationen i uttagsvatten vid endast sötvattenpumpning. Scenariot syftar till att efterlikna hur saltkoncentrationen skulle ändras vid ett normalt uttag av sötvatten vid olika pumpflöden. Här visas att koncentrationen salt i uttagsvattnet ökar i samband med ökande pumpflöde, snabbast vid låga ändringar av flöde och sedan avtar koncentrationsökningen.*

Figur 28 visar hur saltkoncentrationen i sötvattenuttaget minskar med ökande andel saltvattenuttag från djupet. Enligt anpassningen efter data undviks saltvatteninträngning med alla relativa saltvattnuttag som resulterar i en saltkoncentration på mindre än $1\frac{kg}{m^3}$. Notera att vid låga sötvattenuttag stämmer anpassningen sämre, se anpassning med $15\frac{m^3}{år}$ i figuren.



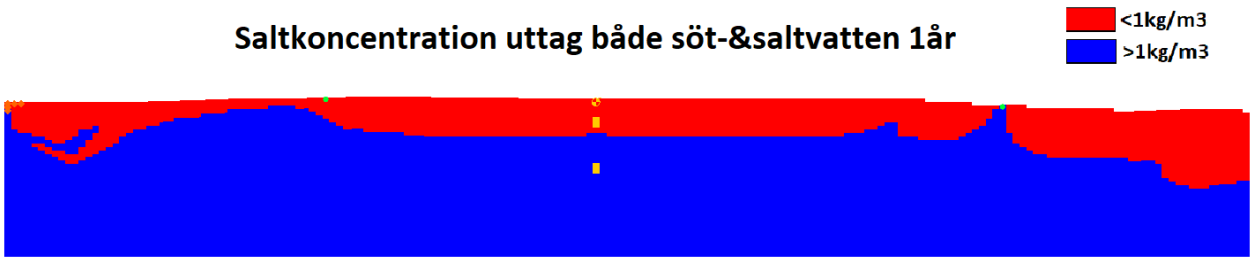
Figur 28: *Saltkoncentration i jämförelse med andelen saltvattenuttag per sötvattenuttag. Här representeras de olika pumpkombinationerna angivna i tabell 5, de olika sötvattenuttag som testas visas som mätpunkterna i figuren. En andragradsanpassning har gjorts för att bättre påvisa trenden. Den bestämda gränsen för accepterad saltkoncentration presenteras här som den horisontella linjen vid* $1\frac{kg}{m^3}$.

Figur 29 visar hur den hydrualiska potentialen varierar under 50 år. Det går att läsa utifrån kurvan att den hydrauliska potentialen ökar under varje halvår som grundvattenbildning sker, den totala trenden beter sig linjärt minskande och i takt med att vattenuttaget påbörjas. De två uttag med minst saltflöden minskar den hydrauliska potentialen ≈30cm på 50 år, dvs ett genomsnitt på -0.6$\frac{cm}{år}$. I det saltvattenuttag med ett flöde på 50$\frac{m^3}{år}$ minskar den hydrauliska potentialen med ≈90cm, dvs ett genomsnitt på -1.8$\frac{cm}{år}$.

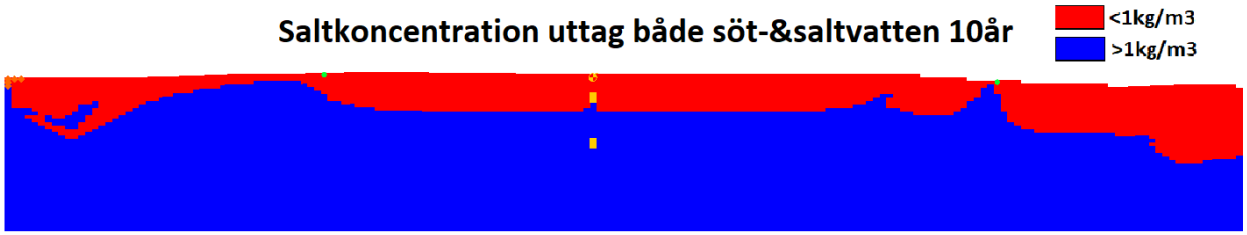


Figur 29: *Hydraulisk potential 2 meter under markytan, där cellen initialt var helt fylld med vatten, efter att vattenuttag påbörjats.*

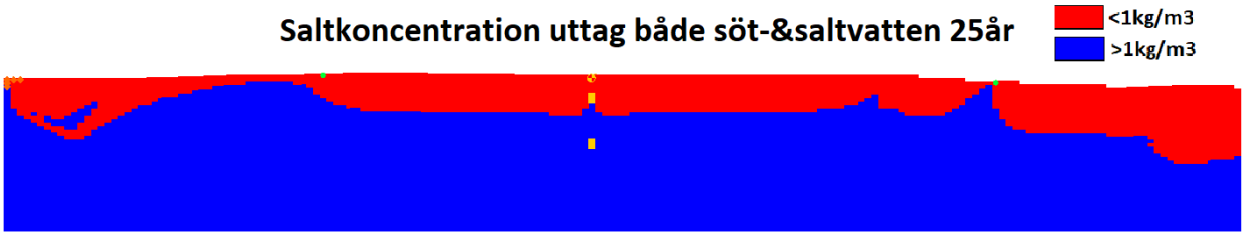
Figur 30a, 30b, 30c och 30d visar hur saltkoncentrationen i marken förändras med tiden. Samtliga figurer representerar simuleringar med transienta pumpningar av både salt och sött grundvatten, sötvattenuttaget sattes till $50\frac{m^3}{år}$ och saltvattenuttaget sattes till $20\frac{m^3}{år}$. Sötvattenuttaget får saltinträngning redan efter 10 år vilket går att utläsa i figur 30b.



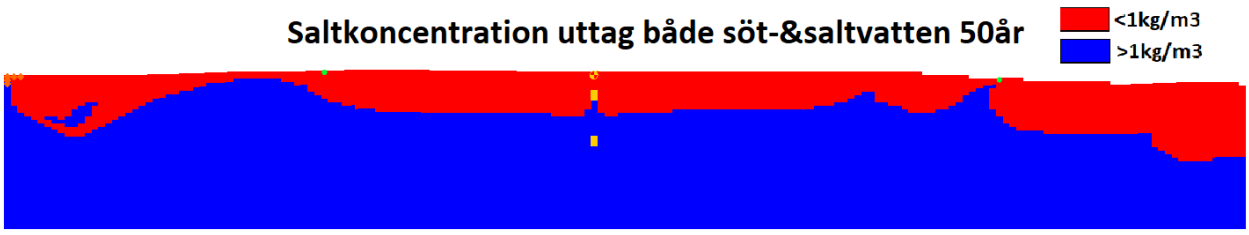
(a)



(b)



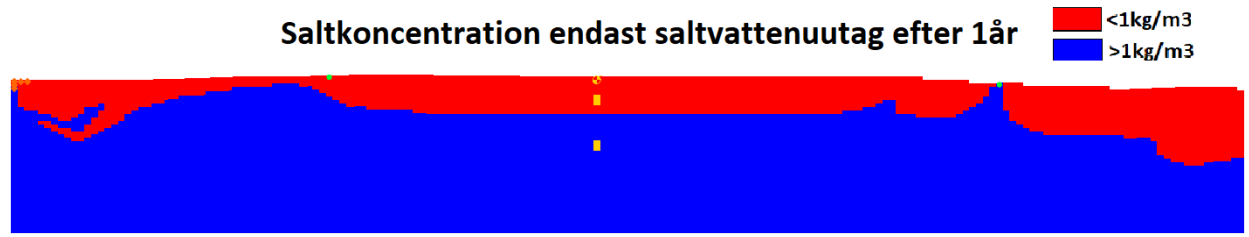
(c)



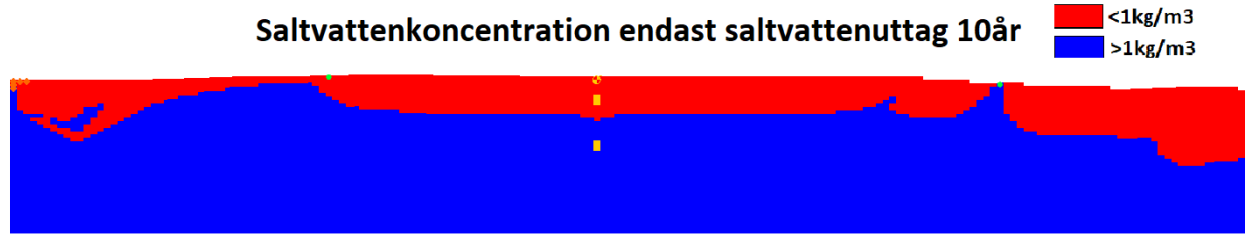
(d)

Figur 30: *Saltkoncentrationen approximerad cell för cell visualiserad i två koncentrationer, större och mindre än* $1\frac{kg}{m^3}$*. De gula ikonerna i respektive figur representerar brunnarnas uttagsdjup.*

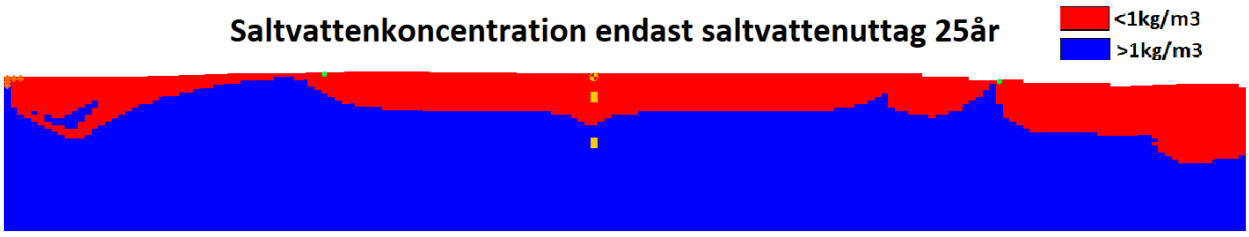
Figur 31a, 31b, 31c och 31d visar hur saltkoncentrationen förändras i marken med tiden. I samtliga scenarion sker endast ett uttag av salt grundvatten från djupet på $20\frac{m^3}{år}$. Ingen sötvatteninträngning sker. Det är sedan denna markvolym innehållande sötvatten som multipliceras med markens porositet för att beräkna volymen sötvatten.



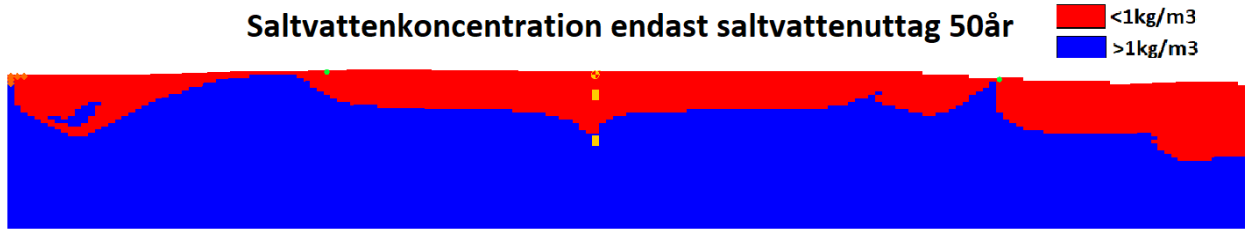
(a)



(b)



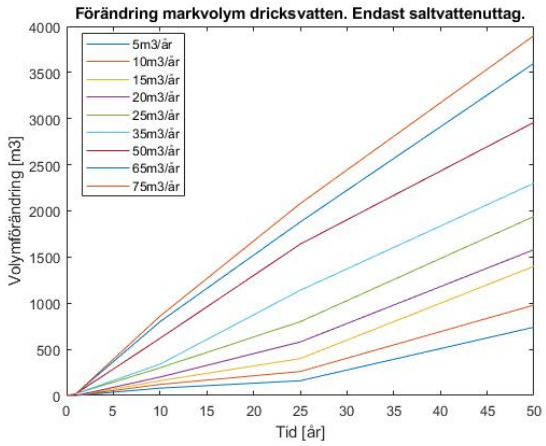
(c)



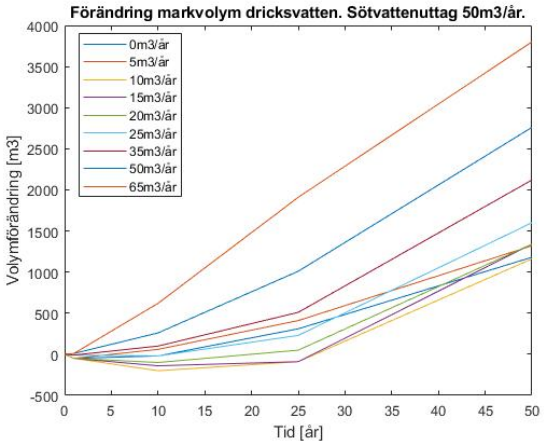
(d)

Figur 31: *Saltkoncentrationen approximerad cell för cell visualiserad i två koncentrationer, större och mindre än* $1\frac{kg}{m^3}$*. Under denna transienta simulering pumpades endast saltvatten med flödet* $20\frac{m^3}{\text{år}}$*. De gula ikonerna i respektive figur representerar brunnarnas uttagsdjup.*

I figur 32 och 33 visas förändring av markvolym fylld med sötvatten över tid vid olika saltvattenflöden. Figur 33 uppvisar hur saltvatteninträngning sker för låga saltvattenuttag och därmed ökar volymen sött vatten mer än vid medelstora saltvattenuttag. Det är sedan denna markvolym innehållande sötvatten som multipliceras med markens porositet för att beräkna volymen sötvatten.



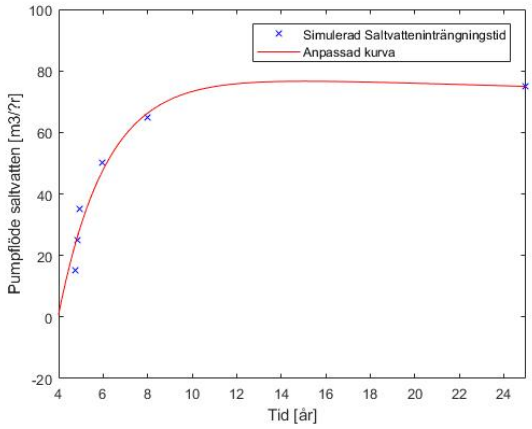
Figur 32: *Total förändring av volym berggrund fylld med sött vatten, i modellen motsvarad av volym celler fyllda med vätska med en saltkoncentration mindre än 1* $\frac{kg}{m^3}$*, vilket motsvarar den ökade grundvattenmagasineringen. Under dessa simuleringar pågår endast ett transient uttag av salt vatten.*



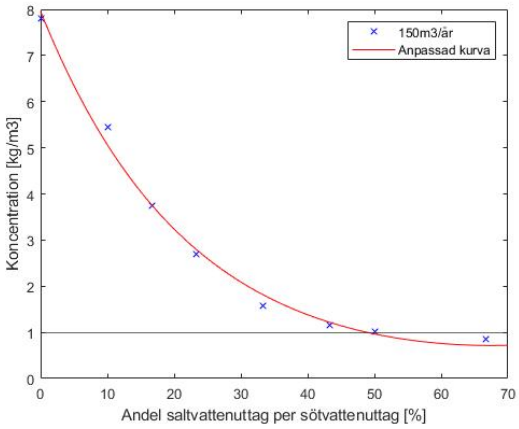
Figur 33: *Total förändring av volym berggrund fylld med sött vatten, i modellen motsvarad av volym celler fyllda med vätska med en saltkoncentration mindre än 1* $\frac{kg}{m^3}$*. Under dessa simuleringar pågår transienta uttag av både sött och salt vatten. Uttagsflödet för saltvatten visas i figuren, uttagsflödet för sötvatten var konstant 50* $\frac{m^3}{\text{år}}$*.*

I tabell 9 och 10 i appendix presenteras de numeriska värden representerade i figur 32 respektive figur 33. I tabell 12 visas att det uppstår ett slags jämviktsläge mellan salt och sötvattenuttagen där grundvattenmagasinet varken minskar eller ökar.

5.2 Plats 2



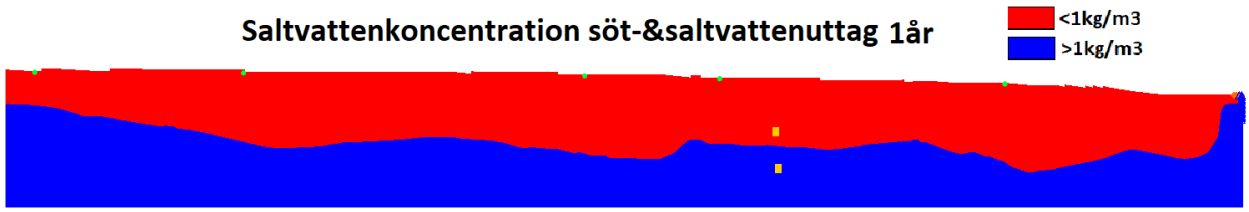
Figur 34: *Tid för saltvatteninträngning vid olika vattenuttag av söt och saltvatten vid plats 2. Sötvattenuttaget sattes till 150$\frac{m^3}{år}$ för att försäkra saltvatteninträngning. Saltvattenuttaget ändrades enligt tabell 6. Saltvatteninträngning har definierats till 1 $\frac{kg}{m^3}$ saltkoncentration i uttagsvattnet enligt avsnitt 3.1.*



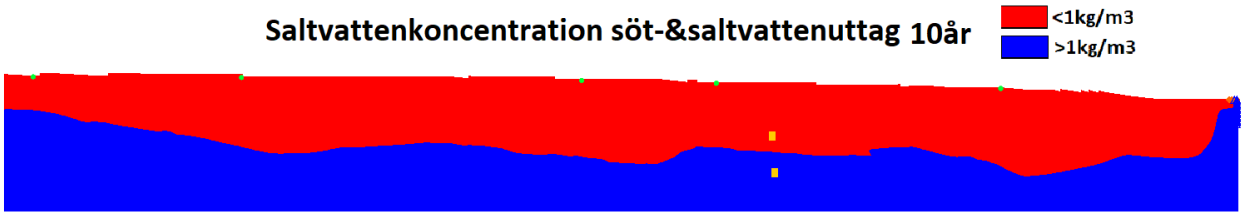
Figur 35: *Saltkoncentration i jämförelse med andelen saltvattenuttag per sötvattenuttag vid plats 2. Här representeras de olika pumpkombinationerna angivna i tabell 6. En exponentialanpassning har gjorts för att bättre påvisa trenden. Den bestämda gränsen för accepterad saltkoncentration representeras av den horisontella linjen vid 1$\frac{kg}{m^3}$.*

I figur 34 visas hur tidpunkten för saltinträngning förändras med det salta pumpflödet när sötvattenuttaget hålls konstant, resultaten visar en asymptotiskt avtagande trend vid höga flöden. Figur 35 visar hur koncentrationen salt förändras med det relativa saltvattenuttaget, resultat indikerar att saltinträngning undviks vid ett relativt saltvattenuttag på 50%.

Figur 36a, 36b, 36c och 36d visar hur saltkoncentrationen i marken förändras med tiden. Samtliga figurer representerar simuleringar med transienta pumpningar av både salt och sött grundvatten. Sötvattenuttaget får ingen saltinträngning och saltvattenuttaget får ingen sötvatteninträngning.

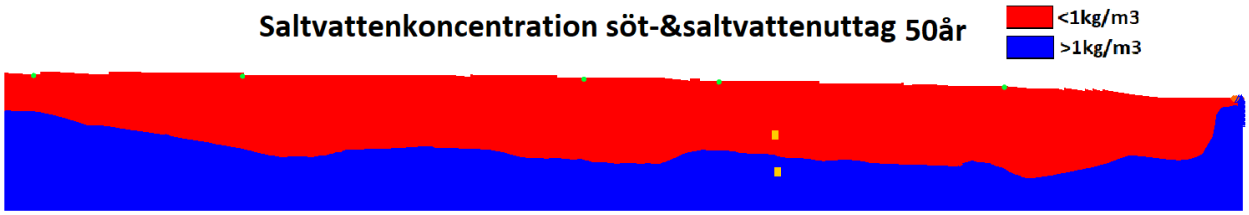


(a)



(b)

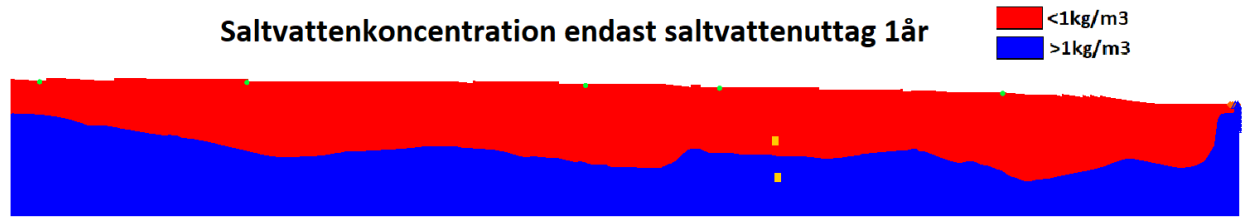
(c)



(d)

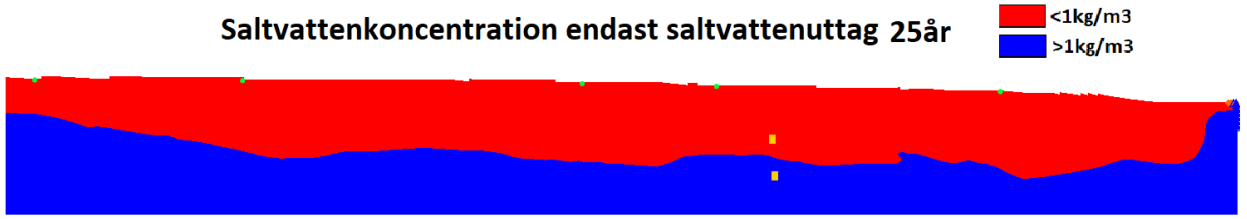
Figur 36: *Saltkoncentrationen approximerad cell för cell visualiserad i två koncentrationer, större respektive mindre och lika med* $1\frac{kg}{m^3}$. *Under de transienta simuleringarna pumpades både salt och sötvatten med flödet* $50\frac{m^3}{år}$ *respektive* $75\frac{m^3}{år}$.*De gula ikonerna i respektive figur representerar brunnarnas uttagsdjup.*

Figur 37a, 37b, 37c och 37d visar hur saltkoncentrationen förändras i marken med tiden. I samtliga figurer sker endast ett uttag av salt grundvatten från djupet på $50\frac{m^3}{år}$. Ingen sötvatteninträngning sker.

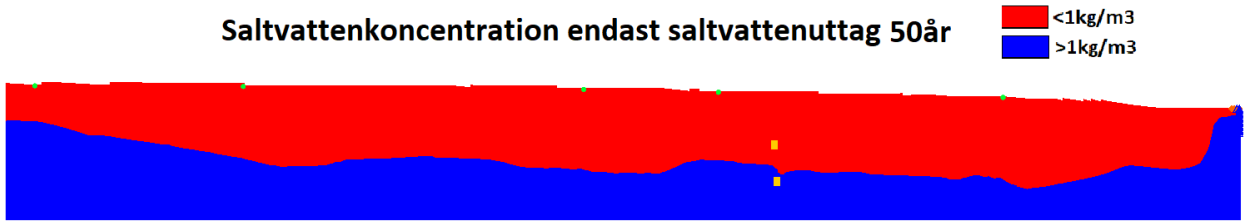


(a)

(b)



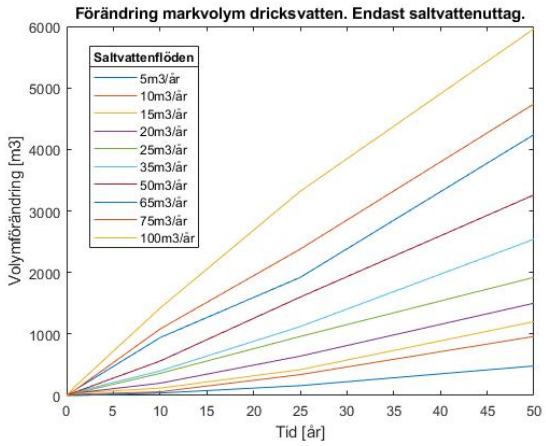
(c)



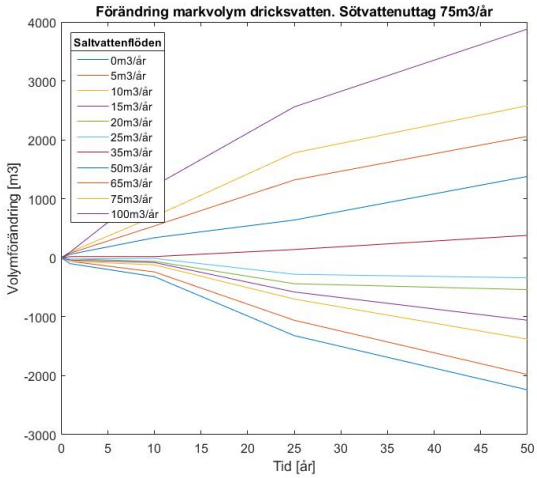
(d)

Figur 37: Saltkoncentrationen approximerad cell för cell visualiserad i två koncentrationer, större samt mindre och lika med $1\frac{kg}{m^3}$. Under de transientaa simuleringarna pumpades endast salt med flödet $50\frac{m^3}{år}$. De gula punkterna i respektive figur representerar uttagspunkterna för brunnarna.

I figur 38 och 39 visas hur volymen sött vatten ändras med tiden. Vid uttag av både sött och salt vatten, figur 39, sker enligt modellundersökningar en minimal sötvatteninträngning vid ett saltvattenuttag på $100\frac{m^3}{år}$.



Figur 38: *Total förändring av volym berggrund fylld med sött vatten, i modellen motsvarad av volym celler fyllda med vätska med en saltkoncentration mindre än 1* $\frac{kg}{m^3}$*. Under dessa simuleringar pågår endast ett transient uttag av salt vatten vilka visas i legenden.*



Figur 39: *Total förändring av volym berggrund fylld med sött vatten, i modellen motsvarad av volym celler fyllda med vätska med en saltkoncentration mindre än 1* $\frac{kg}{m^3}$*. Under dessa simuleringar pågår transienta uttag av både sött och salt vatten, sötvattenuttaget hålls konstant vid 75*$\frac{m^3}{år}$*.*

I tabell 11 och 12 i appendix presenteras de numeriska värden representerade i figur 38 respektive figur 39. I tabell 12 visas att det uppstår ett slags jämviktsläge mellan salt och sötvattenuttagen där grundvattenmagasinet varken minskar eller ökar.

6 Diskussion

Grundvatten har simulerats i en 2D-modell genom att skapa ett tvärsnitt med bredden 1m. Vid 2D-modellering av verkligheten måste vissa förenklingar göras, t.ex. antas marken tvärs emot tvärsnittet vara homogen och alla resultat måste även tolkas med hänsyn till att modellen beskriver ett tvådimensionellt tvärsnitt. I verkligheten måste alltså resultaten för exakta kvantiteter, e.g. numeriska pumpflöden och beräknade volymer, översättas till bredden vid platsen av intresse. Man skulle kunna tänka sig en horisontellt grävs brunn där jag har modellerat ett 1m brett tvärsnitt av ett sådant område. Tabell 9 och 11 visar resultat över ökade volymer sötvatten vid specifika uttag av salt grundvatten, här måste alltså både pumpflöden och ökade volymer beaktas som per meter eftersom modellen är 1m bred. Det innebär att en beräknad förändring av volymen sött vatten i grundvattenmagasinet är dubbelt så stor på ett 2m brett område. Det förklarar varför beräknade volymer kan anses som små eftersom resultat är beräknade för endast 1m.

Vid samtliga simuleringar har det tagits ut salt grundvatten under vinterhalvåret och samtidigt extraherats sött grundvatten under sommarhalvåret. Respektive vatten extraheras alltså endast ett halvår per år. Det innebär att alla volymer som beräknas med hjälp flöden måste halveras.

Figur 25 visar hur koncentrationen av salt i uttagsvattnet förändras över 50 år vid plats 1. När saltvatten pumpas från djupet går det att se hur koncentrationen initialt ökar vid uttagsvattnet för att sedan avta och gå mot ett jämviktsläge. Det tyder på att det initialt riskerar en saltvatteninträngning i uttagsvattnet som sedan kan komma att bli bra med tiden, det sambandet visas i figuren vid ett saltvattenuttag på $25\frac{m^3}{år}$. Anledningen till att det sker skulle kunna vara att saltvattenpumpningen ändrar gränsskitets form så att det vill bukta nedåt mot saltvattenuttagspunkten. Initialt är gränsskiktet i jämviktsläge och därmed dras en viss mängd saltvatten in i sötvattenuttaget innan formen på gränsskiktet återigen ställer in sig. Ytterligare en delorsak som skulle kunna förklara att saltinträngning kan komma att bli bra är det icke jämviktsläge som återfinns i figur 40 där det går att se hur den hydrauliska potentialen ökar med drygt 1cm per år utan pumpning. Även om det är en liten förändring innebär det att modellen ej har nått en jämvikt. Eftersom förändringen av potential ökar indikerar det att modellen fylls på med vatten vilket delvis skulle kunna förklara varför koncentrationen salt i uttagsvattnet initialt ökar för att sedan avta.

Någonting som skulle kunna testas för att undvika saltvatteninträngning är att pumpa salt grundvatten några år innan uttag av sötvatten påbörjas. Det skulle både ge en chans för ökad magasinering och motverka att salt grundvatten tränger in i sötvattenuttaget.

6.1 Koncentration salt

Enligt modellresultat från plats 1 ökar tidpunkten för saltinträngning, när det endast tas ut sötvatten, vid minskning av uttagsflöde för sötvatten vilket visas i figur 26. Resultatet var mestadels enligt förväntan, det enda oväntade resultatet var beteendet av tidsökningen som indikerar en tydlig exponentiell trend med ett asymptotiskt avtagande. Resultat antyder på

att saltinträngning kan ske vid relativt små uttag av sötvatten vid plats 1, det kan bero på dess lägre grundvattenbildning och lägre hydrauliska konduktivitet. Modellresultat från plats 2 visar, se figur 34, på ett liknande sett hur tidpunkten för saltinträngning förskjuts framåt med ökande saltvattenuttag när sötvattenuttaget hålls konstant. Tidpunkten för saltinträngning kan även vara intressant om man vill ta ut en maximal volym sötvatten under en viss tid.

Resultatet för den maximala koncentration salt i uttagsavattnet vid endast pumpning av sötvatten visas i figur 27. Här ökar koncentrationen i takt med ett ökat uttag för att sedan avta mot en asymptot kring $4.4\frac{kg}{m^3}$. När inget salt vatten pumpas ut indikerar resultaten att det går att ta ut maximalt $\approx 13\frac{m^3}{år}$, alltså 6.5 m^3 per halvår, sötvatten vid plats 1 under sommarhalvåret utan att få saltinträngning, vid större uttag kommer saltinträngning ske även om det sker efter mycket lång tid. Att koncentrationen inte når densamma som Östersjöns definierade salthalt på $8\frac{kg}{m^3}$ beror på att pumpflöden som troligtvis skulle resultera i högre koncentration ej kunde genomföras och att en viss inblandning av infiltrerande sötvatten alltid sker. Vid högre pumpflöden torkade cellerna ut fortare än det kunde genereras vatten vilket resulterade i att modellen fick konvergeringsproblem och avbröt simuleringarna. På grund av tidsbrist kunde ingen maximal saltkoncentration undersökas vid plats 2.

För att undersöka om det gick att undvika saltvatteninträngning genom att ta ut salt vatten och möjligtvis även hitta ett optimalt samband mellan de två uttagen testades flera olika flödeskombinationer, se tabell 5 och 6. Enligt modellresultat undviks saltinträngning helt vid plats 1 om saltvattenuttaget är $\approx$45% av sötvattenuttaget då en saltkoncentration på $1\frac{kg}{m^3}$ ansågs som acceptabelt, se figur 28. Högre andel än 70% gav ingen betydande ytterligare sänkning av salthalten vid plats 1. Vid plats 2 undviks saltvatteninträngning om det transient tas ut saltvatten motsvarande $\approx$50% av sötvattenuttaget.

Figur 28 visar koncentrationen salt i uttagsvattnet mot andelen saltvattenuttag. Här har två anpassningar av data genomförts, en med ett sötvattenuttag på $15\frac{m^3}{år}$ och en utan. Det gjordes eftersom att endast ett sötvattenuttag på $15\frac{m^3}{år}$ resulterar i en maximal saltkoncentration på $1.1\frac{kg}{m^3}$ vilket precis definieras som saltinträngning, därför räcker det ett minimalt tillägg av saltvattenuttag tillsammans med den naturliga grundvattenbildningen för att motverka saltinträngning. På grund av det resulterar förhållandet mellan söt och saltvattenuttag i något som skiljer sig från resterande tester och anses därför som icke representativt.

Resultat indikerar alltså att det går att öka sötvattenuttaget markant utan att få saltinträngning om det transient pumpas saltvatten motsvarande hälften av flödet sötvattenuttaget. Självklart finns det ett maximalt uttag där uttaget överskrider det magasinerade vattnet och dess återhämtningsförmåga, enligt modellen är gränsen för ett kombinerat årsmedelflöde strax över $50\frac{m^3}{år}$, ett volymsuttag på $100m^3$, vid plats 1 innan cellerna torkar ut. När cellerna i modellen torkar ut innebär det i verkligheten att marken är torr och grundvattnet är utpumpat. Vid plats 1 innebär det att det går att öka sötvattenuttagsflödet, som utan ett saltvattenuttag maximalt var $\approx 13\frac{m^3}{år}$, till ungefär $65\frac{m^3}{år}$ kombinerat med ett saltvattenuttagsflöde på $30\frac{m^3}{år}$. Vid plats 2 är det maximala kombinerade uttagsflödet ungefär $100\frac{m^3}{år}$ innan modellen torkar ut cellerna. Vid plats 2 innebär det att det maximalt går att ta ut $\approx 135\frac{m^3}{år}$

sötvatten medan ett uttag av saltvatten på $\approx 65\frac{m^3}{år}$ pågår.

Ingen utredning av exakt hur mycket salt-/sötvatten som oavsiktligt tas ut vid en eventuell salt-/sötvatteninträngning har genomförts vilket gör det svårt att avgöra den verkliga effekten det har på de resultat där inträngning sker, i modellen syns endast att brunnen pumpar ut en blandning av sött och salt vatten.

Resultaten får anses vara rimliga eftersom sötvattenuttaget i en större utsträckning arbetar mot gravitationen medan saltvattenuttaget arbetar med gravitationen, därav borde det krävas mindre flöde av saltvattenuttag för att motverka saltvatteninträngning. Precis när saltinträngning undviks placerar uttagsflödena grundvattnet i jämvikt vilket innebär en minimal förändring av gränsen mellan sött och salt grundvatten.

6.2 Volym sötvatten

För att undersöka om det gick att utöka de naturliga grundvattenmagasinen genomfördes flertalet simuleringar där olika kombinationer av sött och salt pumpflöde testades, se tabell 6 och 8. Modellresultat för förändring av volym dricksvatten, dvs vatten med saltkoncentration $\leq 1\frac{kg}{m^3}$, vid uttag av endast salt grundvatten vid plats 1 indikerar ett appoximativt linjärt ökande grundvattenmagasin med tiden förutom vid små saltvattenflöden, se figur 32. Vid låga saltflöden sker en höjning av ökningstakten av grundvattenmagasinet efter 25 år vilket anses som ej verklighetstroget och kan möjligtvis bero på att den volymetriska förändringen är relativt liten och därmed känslig mot störningar eller diskretiseringseffekter i modellen. För samtliga uttag av salt vatten vid plats 1 ökar grundvattemagasinet innehållande sötvatten, störst ökning av grundvattenmagasinet fås med störst uttagsflöde vilket är att förvänta. Enligt figur 32 finns en viss fördröjning av ökningen av grundvattenmagasinet och bedöms ökningen rent volymmässigt dröjer det någonstans mellan 1-10 år, beroende på uttagsflöde, innan ökningen blir av betydelse. Vid ett saltvattenuttag på 50, 65 och $75\frac{m^3}{år}$ sker även sötvatten inträngning i saltvattenuttaget, det innebär att sötvatten från grunvattenmagasinet dras nedåt i marken till den grad att det når saltvattenuttaget. När sötvatteninträngning sker minskas effekten av saltvattenuttaget. Jag har även valt att undersöka den relativa, till hur mycket saltvatten som pumpas ut, ökningen vilket visas till höger i tabell 9 i appendix. Den relativa ökningen av dricksvatten efter 10 år är i medeltal 33.2%, med en standardavvikelse på 5.2%, av saltvattenuttaget. Den relativa ökningen av dricksvatten efter 25 år är i medeltal 33.3%, med en standardavvikelse på 3.0%, av saltvattenuttaget. Den relativa ökningen av dricksvatten efter 50 år är i medeltal 46.0%, med en standardavvikelse på 17.4%, av saltvattenuttaget. Den relativa ökningen efter 50 år har en hög standardavvikelse vilket bedöms bero på ett osäkert extremvärde vid ett saltvattenuttag på $5\frac{m^3}{år}$, det kan även bero på diskretiseringseffekter i modellen men det bör undersökas noggrannare för att bestämma om det kan vara en faktor. Tittar vi närmare på det relativa saltvattenuttaget utan att inkludera 50 år finns en potential att öka grundvattenmagasinet med ungefär $\frac{1}{3}$ av saltvattenuttaget vid plats 1. Det maximala uttaget av endast salt vatten vid plats 1 bedöms vara $35\frac{m^3}{år}$, vilket var det maximala saltvattenuttaget som inte resulterar i sötvatteninträngning under 50 år.

Modellresultat vid plats 1 för ett varierande saltvattenuttag med ett konstant sötvat-

tenuttag visas i figur 33, där går det att se hur volymen sött grundvatten till en början minskar vid låga saltvattenflöden. Vid de lägsta flödena av saltvattenuttag erhålls även en större volym sötvatten jämfört med simuleringarna med något större saltvattenflöden. Det beror på att sötvattenuttaget får inträngning av saltvatten och bidrar därmed efter lång tid till en ökad magasinering av sött grundvatten. Vid låga uttag av saltvatten kan det inte motverka effekten från sötvattenpumpen som suger upp vattnet från djupet, till en början endast sötvatten kring pumpen, som till slut når den övre pumpen och då istället pumpar ut saltvatten. En tydligare visualisering av hur vatten sugs uppåt visas i figur 30a, 30b, 30c och 30d. Saltinträngningen förklarar därmed hur den relativa ökningen, se tabell 10, av sött vatten efter 1 år är -280% och efter 25 år är +91.8% vid ett saltvattenuttag på $5\frac{m^3}{år}$. Om vi jämför volymen sötvatten efter 50 år vid ett endast ett saltvattenuttag på 65 och $50\frac{m^3}{år}$ i tabell 9 och ett saltvattenuttag på 65 och $50\frac{m^3}{år}$ tillsammans med ett sötvattenuttag på $50\frac{m^3}{år}$i tabell 10 är volymen vid ett kombinerat uttag större. Det förklaras av att om det endast tas ut saltvatten med 50 eller $65\frac{m^3}{år}$ sker sötvatteninträngning vilket minskar effektiviteten av uttaget. Ett kombinerat uttagsflöde på $65\frac{m^3}{år}$ saltvatten på vinterhalvåret och $50\frac{m^3}{år}$ saltvatten på sommarhalvåret torkade även ut cellerna vid ytan och kring pumpen innan modellen simulerat hela tidsserien. Min slutsats från resultaten av kombinerade uttagsflöden vid plats 1 är att situationen blir mer komplex och resultaten mer svårlästa när det pumpas både sött och salt vatten, speciellt när det sker saltvatteninträngning och sötvatteninträngning.

Resultat för plats 2 vid endast uttag av salt grundvatten visas i figur 38 där ett approximativt linjärt samband går att se mellan ökad volym berggrund fylld med dricksvatten och tid. För samtliga uttag av salt vatten ökar grundvattenmagasinet innehållande sötvatten vilket anses som rimligt då inget sötvattenuttag sker. Vid saltvattenflöden på 75 och $100\frac{m^3}{år}$ sker sötvatteninträngning vilket med högsta sannolikhet minskar effektiviteten av uttaget. Tabell 11 visar att endast vid höga uttagsflöden sker en tydlig ökning av volymen sött vatten efter 1 år. Efter 1 år uppvisas en stor variation i den relativa ökningen av sött vatten, det kan bero på att det handlar om förändringar av enstaka celler och om en cell approximeras till att vara söt eller salt ger det ett stort utslag på andelen. Den relativa andelen ökat vatten efter 10 år påvisar en större relativ andel ökad volym dricksvatten vid större saltvattenuttag, medelvärdet av den relativa ökningen efter 10 år är 22.4% med en standardavvikelse på 6.3%. Efter 25 år är den genomsnittliga relativa ökningen 25.8% med en standardavvikelse på 2.2%. Efter 50 år påvisas en större relativ andel ökad volym dricksvatten vid lägre saltvattenuttag, medelvärdet efter 50 år är 30.0% med en standardavvikelse på 5.1%. Modellresultat indikerar alltså att det går att öka grundvattenmagasinet vid plats 2 med minst $\frac{1}{5}$ av volymen uttaget saltvatten efter 10 års pumpning, den relativa ökningen blir större med tiden. Notera också den stora skillnaden på den faktiska volymen ökat vatten beroende på saltvattenuttaget vid 10 år och framåt. Efter 10 år genererar ett salt pumpflöde på $50\frac{m^3}{år}$ $560m^3$, en ökning med faktor 14, mer sött grundvatten än vid ett saltvattenflöde på $5\frac{m^3}{år}$. Det maximala uttaget av endast salt vatten vid plats 2 bedöms vara $65\frac{m^3}{år}$, vilket var det maximala saltvattenuttaget som inte resulterar i sötvatteninträngning under 50 år.

Modellresultat vid plats 2 för både salt och sött grundvattenuttag visar hur volym sött grundvatten minskar med låga saltvattenuttag och ökar vid höga saltvattenuttag, se figur

39. Vid ett saltvattenuttag på $100\frac{m^3}{år}$ sker sötvatteninträngning i saltvattenuttaget. Modellresultat anses vara rimliga då minskningen av sötvatten sker när sötvattenuttaget är flera gånger större än saltvattenuttaget vilket borde ge ett nettouttag av sötvatten. Enligt ovan diskuterade modellresultat gällande saltkoncentration för plats 2 finns gränsen för jämvikt mellan uttagen vid ett saltvattenuttag motsvarande $\approx 47\%$ av sötvattenuttaget. storleken på sötvattenmagasinet vid ett sötvattenuttaguttag på $75\frac{m^3}{år}$ borde då hållas konstant vid ett saltvattenuttag på $\approx 35\frac{m^3}{år}$ vilket stämmer väl överens med resultaten synliga i tabell 12 där ökningen av sött vatten vid ett saltvattenuttag på $35\frac{m^3}{år}$ är marginell. Modellresultat påvisar att om ett sötvattenuttag påbörjas samtidigt som ett saltvattenuttag vid plats 2 utan att det sker saltinträngning kan sötvattenflödet maximalt vara dubbelt så stort som saltvattenuttaget för att få en ökning av grundvattenmagasinet. Från tester dras slutsatsen att ett saltvattenuttag på $75\frac{m^3}{år}$, när det samtidigt sker ett sötvattenuttag på $75\frac{m^3}{år}$, är optimalt. Det är det maximala testade saltvattenuttag som inte resulterar i sötvatteninträngning. Det relativa uttaget bedöms som intetsägande när ett kombinerat uttag sker då sötvattenflödet aktivt motverkar saltvattenflödet.

Vid en jämförelse av de två olika platserna vilka representerar två olika scenarion för hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning, se avsnitt 4.5, framkom vissa svårigheter. Vid en analys av simuleringar där både salt och sött vatten pumpats bedöms dessa som otydliga då det simuleras olika sötvattenflöden och det sker olika typer av både söt och saltvatteninträngningar med obestämd effekt. Det som går att jämföra mellan platserna är de simuleringar med endast ett saltvattenuttag och då har jag valt att endast jämföra flödena från 5-$35\frac{m^3}{år}$ då dessa flöden är de enda som inte resulterar i sötinträngning vid någon av platserna. Vid en jämförelse av den relativa förändringen av volymen sött grundvatten ser jag en tydlig trend där resultat vid plats 1 generellt har en marginellt större ökning jämfört med plats 2, se tabell 9 och 11. Den större relativa förändringen av sött grundvatten vid plats 1 måste tas med stor försiktighet då plats 1 och plats 2 har olika förutsättningar i berggrunden vilket leder till olika porositeter. plats 2 har, i jämförelse med plats 1, till exempel en mycket heterogen fördelning av bergrundslager där de olika berggrunderna förekommer osammanhängande och lokalt. Vid jämförelse av volymetriska skillnader mellan plats 1 och plats 2 finns det små skillnader men inget tydligt samband mellan utökad volym berggrund innehållande sötvatten. Däremot går det enligt simuleringar att pumpa med dubbelt så högt flöde vid plats 2 innan cellerna torkar ut vilket troligtvis beror på att grundvattenbildningen vid ytan är högre enligt de olika scenarion som testades och fyller därför på systemet innan det torkar ut, detsamma gäller cellerna kring pumpen där den hydrauliska konduktiviteten tillför mer vatten och därmed tillåter ett högre pumpflöde. Att det skiljer sig åt mellan platserna indikerar på att samspelet mellan hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning är av vikt. Av ovan resonemang dras slutsatsen att hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning måste mätas lokalt med hög noggrannhet för varje plats som ska modelleras om mer exakta resultat önskas.

Figur 39 visar hur grundvattenmagasinet minskar vid relativt små uttag av saltvatten jämfört med sötvattenuttaget. Det gör att resultaten är svåra att jämföra med ett redan befintligt uttag av sötvatten, vilket troligtvis redan är i ett jämviktstillstånd och inte kon-

tinueligt minskar grundvattenmagasinet. Resultaten för ett simultant uttag av sött och salt vatten får därför endast ses som jämförbara om ett uttag av sött och salt grundvatten skulle påbörjas vid samma tillfälle.

Vid alla scenarion för båda platserna når förändringen av magasineringen med dricksvatten inget jämviktstillstånd, det visas i figur 32, 33, 38 och 39 att volymen aldrig slutar förändras. Det indikerar att det finns osäkerheter i vad som händer efter 50 år av uttag och när exakt systemet når jämvikt i samtliga scenarion.

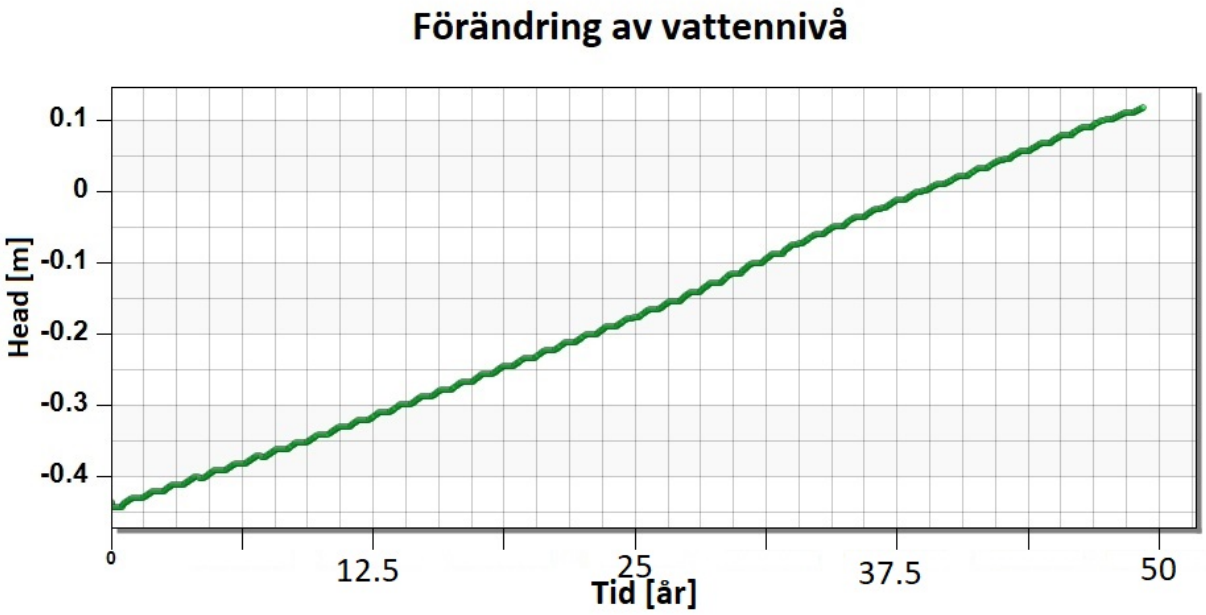
6.3 Förbättringar och osäkerheter

En parameter som skulle kunna vara av stor vikt för både saltinträngning och ökning av sött grundvatten är hur långt avståndet är mellan brunnarna och gränsen mellan sött och salt grundvatten. Brunnarnas avstånd till gränsen mellan sött och salt vatten kommer onekligen definiera hur mycket grundvattenmagasinet kommer kunna ökas. Eftersom avståndet mellan saltvattenbrunnen och gränsen mellan vattenmassorna blir potentialen till att bilda sött grundvatten kan det vara av vikt att undersöka avståndets påverkan. Ett kort avstånd till saltvattenuttaget skulle troligvis betyda sötvatteninträngning vid mindre flöden och det skulle även troligtvis ske snabbare, det sambandet behöver undersökas noggrannare innan någonting kan fastställas. Ett längre avstånd mellan saltvattenuttaget och gränsen mellan sött och salt vatten skulle troligtvis innebära en mindre effekt på magasineringsförändringen, det måste utredas noggrannare innan någonting kan bestämmas. I det här arbetet har brunnarnas placering mestadels placerats efter geologin där magasineringens potential antagits varit störst och inga noggrannare utredningar gällande placeringens inverkan har genomförts.

Från början var tanken att genomföra en noggrann känslighetsanalys av modellen. Eftersom arbetet utvecklades ändrades målsättningen och slutligen testades två olika scenarion för grundvattenbildningar och hydraulisk konduktivitet. Det optimala hade varit att testa båda parameterscenarion på varje plats men på grund av tidsbrist fick det överges. Slutligen valdes värden för horisontell hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning efter vad som gav grundvattennivå och gräns mellan sött och salt vatten som mest efterliknade verkligheten. Noggrannare analyser av horisontell hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning för att se hur det påverkar modellresultat vore av intresse. I samtliga simuleringar uppkommer även numeriska osäkerheter från GMS beräkningsmetoder samt parameterosäkerheter som uppkommer på grund av mätningsmetoden. Även om modellresultaten förefaller som troliga hade en känslighetsanalys av varje varje parameter och dess utslag på resultatet varit att önska för att säkerställa modellens robusthet.

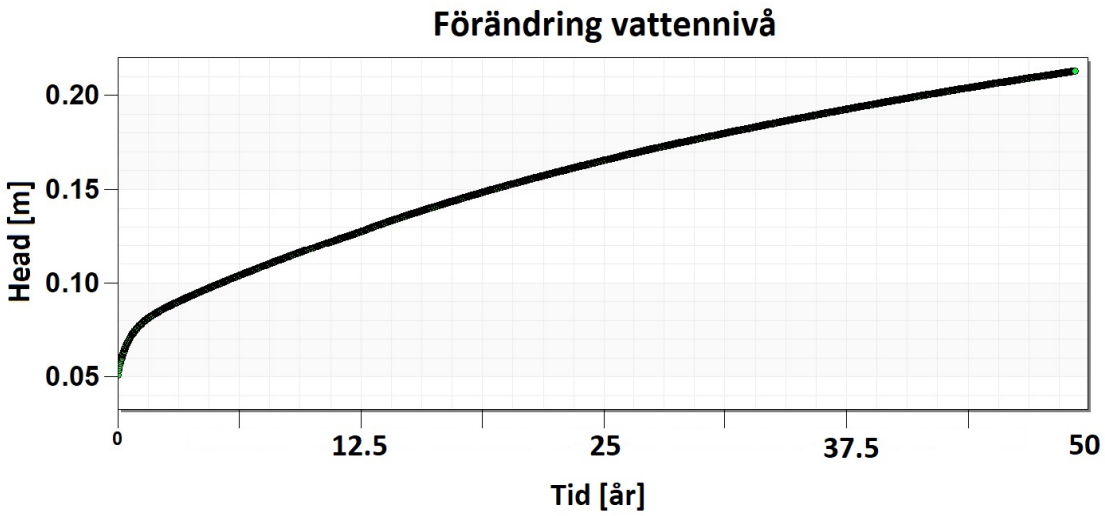
Valet att simulera ett sötvattenuttag på $50\frac{m^3}{år}$ vid utredning av ökad volym sött vatten vid plats 1 tolkas i efterhand som förhastat. Sötvattenflödet på $50\frac{m^3}{år}$ resulterade i saltvatteninträngning som komplicerade analysen om jämförelsen av resultatet. Den slutsats som dras är att helt undvika uttagsflöden som resulterar i saltvatteninträngning. Vid eventuell implementering av metoden i verkligheten bör en kontinuelig mätning av halten salt göras i uttagsvattnet för att försäkra att inträngning undviks, det görs enklast genom att mäta konduktivitet vid bestämda tidsintervall.

Figur 40 visar hur den hydrauliska potentialen förändras i cellen vid markytan under 50 år utan något vattenuttag. Initialt ses en negativ hydraulisk potential vid ≈-0.45m som sedan stadigt ökar till ≈+0.12m efter 50 år, en genomsnittlig förändring av hydraulisk potential på $+1.14\frac{cm}{år}$.



Figur 40: *Hydraulisk potential i cellen precis vid markytan innan vattenuttag påbörjats. Det går att utläsa att cellen vid markytan initialt var delvis uttorkad.*

Figur 41 visar hur den hydrauliska potentialen förändras i cellen vid markytan under 50 år utan något vattenuttag. Initialt ses en minimalt positiv hydraulisk potential vid ≈0.06m som sedan stadigt ökar till ≈0.21m efter 50 år, en genomsnittlig förändring av hydraulisk potential på $0.3\frac{cm}{år}$



Figur 41: *Hydraulisk potential vid markytan innan vattenuttag påbörjats. Det går att utläsa att cellen vid markytan under hela perioden är delvis översvämmad.*

Figur 40 och 41 visar den hydrauliska potentialen i cellen vid markytan vilket i modellen är grundvattenytan, där den vid både plats 1 och plats 2 ökar med tiden. Även om det är en liten förändring betyder det att modellen ej har nått en jämvikt och vattennivån långsamt ökar. En ökning av vattennivå skulle kunna påverka modelleringsresultaten av grundvattenmagasinet genom att överskatta volymen ökat grundvatten. För att minimera risken för överskattning beräknades ökningen av volymen sött vatten vid varje tidssteg när inget uttag av vatten gjordes, volymen subtraherades sedan från motsvarande tidssteg vid varje pumpsimulering för att minska felmarginalen. Även om felet i den direkta volymen sött vatten subtraherades kan det finnas ändringar i grundvattnets dynamik som förändras, på grund av en instabil vattennivå, som inte tagits hänsyn till. Tillgängliga data över variationer i grundvattennivå, se figur15 och 16, lyckades inte efterföljas. Data för variation av grundvattennivå indikerar att grundvattennivån kan variera mer än 1m vilket inte efterföljs i modellen. Tillgänglig data för variation i grundvattennivå anses som osäkra då de är tagna från platser vid norra Gotland där grundvattennivån ligger 30 m.ö.h medan vattennivån i modellen ligger enstaka meter ovanför havsnivå.

Mycket tid har gått åt till den manuella kalibreringena av modellen genom att ändra hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning för att efterlikna data över grundvattennivåer, hydraulisk potential och gräns mellan sött och salt vatten samtidigt.Ett alternativ till att manuellt kalibrera modellen är att använda det inbyggda kalibreringsverktyget *Automatic Parameter Estimation* (PEST). Med hjälp av PEST ska det gå att automatiskt optimera modellparametrar genom att ange grundvattennivåer och hydraulisk potential, initialgissningar för parametrar kan även anges för en bättre estimering. För eventuellt framtida undersökningar rekommenderar jag att undersöka för-&nackdelar av att eventuellt använda PEST.

Vid definition av salt vatten har en koncentration på $1\frac{kg}{m^3}$, motsvarande $1000\frac{mg}{l}$, använts enligt TDS-metoden. TDS (Total Dissolved Solids) mäter torrvikten av alla salter förekom-

mande i dricksvatten per volym vatten. Enligt livsmedelsverket kan korrosion i ledningar öka om kloridhalter överstiger $100\frac{mg}{l}$ och smakförändringar ske vid redan $300\frac{mg}{l}$. Även natriumhalter över $200\frac{mg}{l}$ kan ge en salt smak, vid högre natriumhalter förkommer hälsorisker (Livsmedelsverket, 2020). Vid svenska vattenverk undersöks endast kloridhalten där målsättningen är att dricksvatten vid konsument understiger gränsvärdet $100\frac{mg}{l}$ (Norsjö kommun, 2020). Det innebär alltså att modelleringsresultat kan skilja sig åt beroende på vilken salthalt som undersöks. Om gränsvärdet för klorid, $100\frac{mg}{l}$, hade använts vid modellering bör saltinträngning troligtvis ske fortare och i större utsträckning än vad som modellerats med en saltkoncentration på $1000\frac{mg}{l}$, se figur 25. En lägre definierad koncentration av saltvatten vatten hade troligtvis resulterat i en något mindre ökning av volym sött grundvatten, även det måste undersökas noggrannare innan något kan bestämmas.

Under arbetets gång har mycket tyngd lagts på att simulera saltvattenuttag för att undersöka en ökad magasineringsförmåga. För att förbättra modelleringsunderlaget kan fler simuleringar av sötvattenuttag genomföras för att se hur det påverkar magasineringen i en större utsträckning.

6.4 I praktiken

För att få en bättre förståelse för vad modellresultat kan innebära i verkligheten har en enklare jämförelse genomförts över hur många människors vattenbehov vattenuttagen motsvarar.

Vid plats 1 indikerar modellresultat på ett maximalt sötvattenuttag motsvarande ett flöde på $65\frac{m^3}{år}$ under sommarhalvåret per meter akvifersbädd. Undersöks ett område med bredden 75m resulterar det i en total uttagsvolym på $2437m^3$ på ett år [1], sötvatten extraheras då endast under sommarhalvåret i enlighet med modellering. Enligt svenskt vatten använder en person i genomsnitt 140 $\frac{l}{dag}$ sött vatten (Svenskt vatten, 2017). Det skulle då resultera i en sommarförbrukning av vatten motsvarande 95.6 personer.

Vid plats 2 indikerar modellresultat på ett maximalt sötvattenuttag på $135\frac{m^3}{år}$. Enligt motsvarande beräkningar som för plats 1 skulle det resultera i ett vattenuttag som räcker till 198 personers sommarförbrukning vid plats 2.

Dessa resultat är starkt sammankopplade med hur pass stort område som pumpas och bör därmed bara ses som en indikation på hur många människor som kan hjälpas. I verkligheten måste en exakt längd där vatten tas ut bestämmas efter vad som är praktiskt genomförbart och hur många människors vattenbehov som vill tillgodoses, där ett större pumpområde resulterar i vatten till fler människor och vice versa för ett mindre pumpområde.

Modellresultat indikerar på att det är en stor variation mellan hur många människors vattenförbrukning sötvattenflödet motsvarar vid de två olika platserna. Det beror med högsta sannolikhet på de olika scenarior som testats där plats 2 har en större grundvattenbildning. Sanningen ligger någonstans mitt emellan resultaten för de båda platserna och antalet perso-

[1] $65\frac{m^3}{år}\frac{1}{m \cdot 0.5år} \cdot 75m \cdot 0.5år = 2437m^3$ per år

ner som vattenuttaget hjälper kan därmed användas som gränsvärden. Plats 2 indikerar på det maximala antalet personers vattenförbrukning som kan förväntas uppfyllas medan plats 1 indikerar sötvattenuttaget motsvarande minsta antalet personers vattenförbrukning som kan förväntas.

För att försäkra att tillräckligt med vatten infiltrerar till berggrunden och därmed tillgodoser uttaget kan en infiltrationsbädd installeras vid markytan vid uttagsområdet. En infiltrationsbädd är ett sätt att öka infiltrationen och och sprida vattnet i en mer homogen utsträckningen och därmed öka grundvattenbildningen genom att modifiera markytans komposition.

6.5 Sammanfattning av frågeställningar

- Till vilken grad går det att öka den naturliga grundvattenmagasineringen på den valda platsen?

Två platser har valts. Vid plats 1 går det att öka grundvattenmagasineringen med $\approx \frac{1}{3}$ av saltvattenuttaget när inget sötvattenuttag sker. Enligt modellering bedöms det maximala uttaget av endast salt grundvatten vid plats 1 vara $35\frac{m^3}{år \cdot m}$ vilket resulterar i en ökning av magasinering av sött grundvatten på $20m^3$ efter 1 år, $340m^3$ efter 10 år, $1140m^3$ efter 25 år och $2320m^3$ efter 50 år. Från modellresultat är det svårt att avgöra hur mycket grundvattenmagasinet går att öka vid plats 1 om det tas ut sött grundvatten.

Vid plats 2 går det att öka grundvattenmagasineringen med minst $\frac{1}{5}$ av saltvattenuttaget när inget sötvattenuttag sker. Enligt modellering bedöms det maximala uttaget av endast salt grundvatten vid plats 2 som $65\frac{m^3}{år \cdot m}$ vilket resulterar i en ökning av magasinering av sött grundvatten på $120m^3$ efter 1 år, $940m^3$ efter 10 år, $1920m^3$ efter 25 år och $4240m^3$ efter 50 år. Vid plats 2 simulerades ett sötvattenuttag på $75\frac{m^3}{år \cdot m}$ där resultat indikerar en optimal magasinering om saltvattenuttaget är 75-100$\frac{m^3}{år \cdot m}$ vilket resulterar i en ökning av magasinering av sött grundvatten på minst $120m^3$ efter 1 år, $700m^3$ efter 10 år, $1780m^3$ efter 25 år och $2580m^3$ efter 50 år

Modellresultat indikerar alltså på att det är en avvägning mellan att ta ut maximalt sötvatten och maximera ökningen av sötvatten i grundvattenmagasinet, båda kan inte uppnås men beroende på målet finns det ett optimalt samband mellan söt och saltvattenuttag

- Hur påverkas gränsen mellan sött och salt vatten samt dynamiken mellan vattenmassorna vid ett uttag av saltvatten?

Gränsen mellan sött och salt vatten sjunker djupare ned i marken, med störst effekt närmast uttagsbrunnen, i samband med ett uttag av salt grundvatten. Dynamiken mellan söt och saltvatten förblir i stort densamma, ingen markant blandning av vattenmassorna sker.

- Hur påverkar ett sötvattenuttag, under sommaren, grundvattenmagasinet? Dvs vad är den maximala volym sötvatten som går att ta upp för att samtidigt bibehålla en balans mellan magasinering och uttag?

Ett sötvattenuttag under sommaren minskar möjligheterna att öka grundvattenmagsinet. Den maximala volym sötvatten som går att ta upp för att samtidigt bibehålla en balans mellan magasinering och uttag vid plats 1 är $\approx 65 \frac{m^3}{år \cdot m}$ om det samtidigt tas ut $\approx 30 \frac{m^3}{år \cdot m}$ salt grundvatten. Den maximala volym sötvatten som går att ta upp för att samtidigt bibehålla en balans mellan magasinering och uttag vid plats 2 är $\approx 135 \frac{m^3}{år \cdot m}$ om det samtidigt tas ut $\approx 65 \frac{m^3}{år \cdot m}$ salt grundvatten.

- Hur känslig blir modellen för parameterosäkerheter?

Ett specifikt mått på modellens parameterkänslighet har inte kunnat definieras. Det som går att säga är att det finns känsligheter i modellen vid förändringar av grundvattenbildning och horisontell hydraulisk konduktivitet. Jämförelse av modellresultat vid platserna blev svårt då förutsättningarna skiljer sig, t.ex. är berggrunden olika vilket medför olika porositeter. Modellresultat indikerar på att högre grundvattenbildning och högre horisontell hydraulisk konduktivitet tillåter ett större uttagsflöde innan grundvattenmagasinet torkar ut inom 50 år.

- Ekonomisk aspekt

I syftet diskuterades även en ekonomisk aspekt av projektet om det skulle komma att implementeras i verkligheten. Vid ett eventuellt fortsatt arbete rekommenderas plats 1 ur en ekonomiskt aspekt på grund av kortare avstånd till hav för anläggande av transportrör, borrdjup till gräns mellan sött och salt vatten samt mindre bebyggelse att ta hänsyn till. För att försäkra att ingen inträngning sker bör koncentration salt mätas kontinuerligt i uttagsvattnet.

7 Slutsats

Saltvattenpumpning möjliggör avsevärt större sötvattenuttag på sommaren utan att saltvatteninträngning sker, om det genomförs korrekt. Resultaten tyder på att saltvattenpumpning på vinterhalvåret motsvarande hälften av sötvattenpumpningen på sommaren möjligör ett hållbart sötvattenuttag utan saltinträngning. För de modellerade geologiska platserna skulle en t.ex. en 75m bred anläggning, med en horisontellt grävd brunn, kunna försörja 100-200 fler personekvivalenter med sötvatten under sommarhalvåret.

Sammanfattningsvis anser jag att konceptet har goda förutsättningar att öka andelen sött grundvatten på Gotland och hjälpa de människor som är i behov av vatten under sommaren. Testas konceptet yrkar jag på försiktigthetsprincipen och rekommenderar att inte överutnyttja vattenresurserna. Det finns dock fortfarande osäkerheter som t.ex. exakt hur pass djupt uttagsbrunnarna bör grävas samt om projektet är ekonomiskt genomförbart.

Referenser

Adger, W., Terence Hughes, Carl Folke, Stephen Carpenter och Johan Rockström (sept. 2005). "Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters". I: *Science (New York, N.Y.)* 309, s. 1036–9. DOI: 10.1126/science.1112122.

Andersson, M (aug. 2019). "Ökad grundvattenbildning genom pumpning av salt grundvatten från berggrunden på Gotland". Diss. Uppsala Universitet. DOI: ISSN1401-5765.

Australian government (2019). *Australian Drinking Water Guidelines*. Tekn. rapport.

Bakker, Mark (jan. 2000). "The size of the freshwater zone below an elongated island with infiltration". I: *Water Resources Research - WATER RESOUR RES* 36, s. 109–118. DOI: 10.1029/1999WR900300.

Bear, Jacob. (1979). *Hydraulics of groundwater / Jacob Bear*. English. McGraw-Hill International Book Co London ; New York, xiii, 567 p. : ISBN: 0070041709.

Bjerg, Poul L. (mars 2008). *Dispersion in aquifers*. English.

C, Heath Ralph (1983). *Basic Ground-Water Hydrology*. English. Tekn. rapport.

Change, IPPC-Climate (jan. 2007). "Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change". I: *Synthesis Report*.

Charles, Fetter (2001). *Applied Hydrogeology. 4th Edition ed.*

Dahlqvist, Karin Sjöstrand, Andreas Lindhe, Lars Rosén, Nisell, Hellstrand och Holgersson (okt. 2019). "Potential Benefits of Managed Aquifer Recharge MAR on the Island of Gotland, Sweden". I: *Water* 11, s. 2164. DOI: 10.3390/w11102164.

Day, Paul R. (1956). "Dispersion of a moving salt-water boundary advancing through saturated sand". I: *Eos, Transactions American Geophysical Union* 37.5, s. 595–601. DOI: 10.1029/TR037i005p00595. eprint: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/TR037i005p00595. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR037i005p00595.

Ebrahimi, Kumars, Mohammad Reza Nazem, Zahra Mardani, Shahab Araghinejad och Abdolmajid Liaghat (2018). "Estimation of Longitudinal and Transverse Dispersion Coefficients in Saturated Porous Media Involving Physical Model". I: *HIC 2018. 13th International Conference on Hydroinformatics*. Utg. av Goffredo La Loggia, Gabriele Freni, Valeria Puleo och Mauro De Marchis. Vol. 3. EPiC Series in Engineering. EasyChair, s. 643–650. DOI: 10.29007/ldlk. URL: https://easychair.org/publications/paper/HmQG.

EU (2000). *ramdirektivet för vatten,artikel 2 punkt 13*.

Ferris, J.G., D.B. Knowles, R.H. Brown och R.H. Stallman (1962). *Theory of Aquifer Tests*. English. Report.

Freeze, R. Allan och John A. Cherry (1979). *Groundwater*. Upper Saddle River, NJ 07458: Prentice Hall, Inc.

Ge, Shemin och Steven Gorelick (jan. 2014). "Hydrology, Floods and Droughts: Groundwater and Surface Water". I: s. 209–216. DOI: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00171-7.

Golder Associates (2017a). *Grundvattenmodell*. Tekn. rapport. URL: https://www.cementa.se/sites/default/files/assets/document/bb/ed/4._grundvattenmodell.pdf (hämtad 2019-09-26).

Golder Associates (2017b). *Hydrogeologiska fältundersökningar på File hajdar*. Tekn. rapport. URL: https://www.cementa.se/sites/default/files/assets/document/6d/fb/4._grundvattenmodell_-_bilaga_2_hydrogeologiska_faltundersokningar_pa_file_hajdar_med_underbilagor-1.pdf (hämtad 2019-09-26).

Gotland, Region (2020). *Vattenskyddsområden Gotland*. URL: http://gotland.maps.arcgis.com/apps/Viewer/index.html?appid=9cd62ddbe7dd46f6a1ed24c19ecb42ce (hämtad 2020-01-27).

Grip, Harald och Allan Rodhe (2019). *Water's Journey from Rain to Stream*. 1. utg. Department Earth Sciences, Uppsala University, s. 153. ISBN: 978-91-639-0457-8. URL: http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-307562.

Grundfors (2019). *Grundfors hemsida*. Tekn. rapport. URL: https://product-selection.grundfos.com/sizing-result.html?qcid=677640719&sizetype=quick (hämtad 2019-10-17).

Guo, Weixing, C.D. langevin, D. Jr, Alyssa Dausman och Michael Sukop (jan. 2008). *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport*. DOI: 10.13140/RG.2.2.22879.97444.

Harbaugh, A.W., Edward Banta, Mary Hill och M.G. McDonald (jan. 2000). "MODFLOW-2000, the U.S. geological survey modular ground-water flow model-User guide to modularization concepts and the groundwater flow process". I: *U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92*.

Holt, Tobias, Janek Greskowiak, Stephan Seibert och Gudrun Massmann (aug. 2019). "Modeling the Evolution of a Freshwater Lens under Highly Dynamic Conditions on a Currently Developing Barrier Island". I: *Geofluids* 2019. DOI: 10.1155/2019/9484657.

Lind, Bo och Mats Nyborg (1986). *Moränstruktur och hydraulisk konduktivitet*. Tekn. rapport. URL: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179514/local_179514.pdf (hämtad 2020-01-16).

Livsmedelsverket (2020). *Dricksvatten från enskilda brunnar och mindre vattenanläggningar*. URL: https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/publikationsdatabas/handbocker-verktyg/handbok_enskilda_brunnar.pdf (hämtad 2020-01-30).

Livsmedelsverket och SGU (2014). *Att anlägga egen brunn för bra dricksvatten*. URL: https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/publikationsdatabas/broschyrer/broschyr-att-anlagga-egen-brunn-20-sid-a4-final.pdf (hämtad 2019-10-18).

Lundagrossisten (2018). *Lundagrossistens VVS-kunskap steg 2*. Tekn. rapport. URL: https://lundagrossisten.se/animated-vvssteg2/files/assets/common/downloads/publication.pdf (hämtad 2019-10-17).

Länsstyrelserna (2020). *Geodatakatalogen*. URL: https://ext-geodatakatalog.lansstyrelsen.se/GeodataKatalogen/ (hämtad 2020-01-27).

Morris, Donald Arthur och A. I. Johnson (1966). "Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60". I:

NE (2019). *Östersjön*. (Hämtad 2020-01-16).

Norsjö kommun (2020). *Gränsvärden dricksvatten*. URL: https://www.norsjo.se/default.aspx?id=19136 (hämtad 2020-01-30).

Region Gotland (2016a). *Gotlands grundvatten och dricksvatten*. Tekn. rapport. URL: https://www.gotland.se/94272 (hämtad 2019-09-26).

Region Gotland (2016b). *Riktlinjer mellan djurhållning och bebyggelse*. URL: https://gotland.se/34317 (hämtad 2019-10-16).

Region Gotland (2019a). *Befolkningsprognos 2019-2029*. Tekn. rapport. URL: https://www.gotland.se/103757 (hämtad 2019-09-25).

Region Gotland (2019b). *Enskilt dricksvatten*. URL: https://www.gotland.se/1778 (hämtad 2019-09-25).

Region Gotland (2019c). *Nyhetsartikel, Fjolårets torka*. URL: https://www.lansstyrelsen.se/gotland/om-oss/nyheter-och-press/nyheter---gotland/2019-07-05-38-miljoner-kronor-till-gotlandska-lantbrukare-efter-fjolarets-torka.html (hämtad 2020-01-14).

Region Gotland (2019d). *Vattenskyddsområden Gotland*. URL: https://www.gotland.se/vattenskydd (hämtad 2019-10-08).

SA health (2020). *Salinity and drinking water*. URL: https://www.sahealth.sa.gov.au/wps/wcm/connect/public+content/sa+health+internet/protecting+public+health/water+quality/salinity+and+drinking+water (hämtad 2020-01-27).

SGU (2015). *SkyTEM-undersökningar på Gotland del 2, rapport 140*. URL: http://resource.sgu.se/produkter/rm/rm140-rapport.pdf (hämtad 2019-09-30).

SGU (2017a). *Grundvattenbildning och grundvattentillgång i Sverige*. Tekn. rapport.

SGU (2017b). *Våtmarker och grundvattenbildning*. Tekn. rapport. URL: http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1701-rapport.pdf (hämtad 2019-09-26).

SGU (2019a). *Brunnsarkivet*. URL: https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html (hämtad 2019-09-30).

SGU (2019b). *Hitta vatten på Gotland*. URL: https://sgu.se/om-sgu/nyttoexempel/uppdrag-hitta-vatten-pa-gotland/ (hämtad 2019-09-25).

SGU (2019c). *Nyhetsartikel, Fjolårets torka*. URL: https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2019/december/grundvattennivaer-i-december/ (hämtad 2020-01-14).

SLU (2020). *SLU geodata*. URL: https://www.slu.se/site/bibliotek/anvanda-biblioteket/soka/digitala-kartor/ (hämtad 2020-01-27).

SMHI (2019). *Gotlands Klimat*. URL: http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/gotlands-klimat-1.4887 (hämtad 2019-09-25).

Svenskt vatten (2017). *Värt att veta om vatten*. URL: https://www.svensktvatten.se/globalassets/fakta-om-vatten/dricksvattenfakta/vart-att-veta-om-vatten_2017.pdf (hämtad 2020-02-10).

Svenskt vatten (2019). *Dimensionering och materialval av rör*. Tekn. rapport. URL: https://www.svensktvatten.se/vattentjanster/rornat-och-klimat/hallbar-nyanlaggning/ (hämtad 2019-10-17).

Sällström, Oskar (2017). *Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland*. Tekn. rapport. URL: http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=8912043&fileOId=8912055 (hämtad 2020-01-16).

Zheng, Chunmiao (jan. 1992). *MT3D: A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*.

8 Bilagor

Tabell 9: *Till vänster i tabellen presenteras magasineringsförändring av sött vatten, dvs en saltkoncentration mindre än 1$\frac{kg}{m^3}$. Det är samma siffror som visualiseras i figur 32. Till höger i tabellen presenteras en procentuell andel, det är den totala volymen ökat dricksvatten jämfört med total volym uttaget salt vatten vid angiven tid. För att beräkna volymen sött vatten i bergrunden har en porositet på 0.28 antagits för hela markvolymen innehållande dricksvatten. Under dessa simuleringar sker endast ett saltvattenuttag.*

	Volymökning sötvatten					Volymökning sötvatten/Utpumpat saltvatten				
Salt pump-flöde [$\frac{m^3}{år}$]	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år
			[m^3]					[%]		
5	0	0	80	160	760	0	0	44.8	35.8	85.1
10	0	0	120	260	1000	0	0	33.6	29.1	56.0
15	0	0	160	400	1420	0	0	29.9	29.9	53.0
20	0	0	200	580	1600	0	0	28.0	32.5	44.8
25	0	20	300	800	1960	0	22.4	33.6	35.8	43.9
35	0	20	340	1140	2320	0	16	27.2	36.5	37.1
50	0	20	620	1640	2980	0	11.2	34.7	36.7	33.4
65	0	20	800	1880	3620	0	8.6	34.5	32.4	31.2
75	0	20	860	2080	3920	0	7.5	32.1	31.1	29.3

Tabell 10: *Till vänster i tabellen presenteras förändring av volym sött vatten i marken, dvs vatten med en saltkoncentration mindre än 1$\frac{kg}{m^3}$. Dessa är samma siffror som visualiseras i figur 33. Till höger i tabellen presenteras en procentuell andel, den andelen är den totala volymen ökat dricksvatten jämfört med total volym uttaget salt vatten efter angiven tid, för beräkningen har en genomsnittlig porositet på 0.22 antagits för hela markvolymen innehållande dricksvatten. Under dessa simuleringar sker både ett saltvattenuttag, som visas i tabellen, och ett konstant sötvattenuttag på 50 $\frac{m^3}{år}$.*

	Volymökning sötvatten					Volymökning sötvatten/Utpumpat saltvatten				
Salt pump-flöde [$\frac{m^3}{år}$]	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år
			[m^3]					[%]		
0	0	-50	-20	310	1210	0	-	-	-	-
5	0	-50	60	410	1350	0	-280	33.6	91.8	151.2
10	0	-50	-200	-90	1190	0	-140	-56.0	-10.1	66.6
15	0	-50	-140	-90	1370	0	-93.3	-26.1	-6.7	51.1
20	0	-50	-100	50	1370	0	-70.0	-14.0	2.8	38.4
25	0	-10	-20	230	1630	0	-11.2	-2.2	10.3	36.5
35	0	-10	100	510	2150	0	-8.0	8.0	16.3	34.4
50	0	10	260	1010	2790	0	5.6	14.6	22.6	31.2
65	0	10	620	1910	3830	0	4.3	26.7	32.9	33.0

Tabell 11: *Till vänster i tabellen presenteras förändring av volym sött vatten i marken, dvs vatten med en saltkoncentration mindre än 1$\frac{kg}{m^3}$. Det är samma siffror som visualiserats i figur 38. Till höger i tabellen presenteras en procentuell andel, den andelen är den totala volymen ökat dricksvatten jämfört med total volym uttaget salt vatten vid efter angiven tid, för beräkningen har en genomsnittlig porositet på 0.22 antagits för hela markvolymen innehållande dricksvatten. Under simuleringarna sker endast ett saltvattenuttag.*

	Volymökning sötvatten					Volymökning sötvatten/Utpumpat saltvatten				
Salt pumpflöde [$\frac{m^3}{år}$]	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år
			[m^3]					[%]		
5	0	20	40	160	480	0	80.0	16.0	25.6	38.4
10	0	40	60	340	960	0	80.0	12.0	27.2	38.4
15	0	60	120	420	1200	0	80.0	16.0	22.4	32.0
20	0	60	200	640	1500	0	60.0	20.0	25.6	30.0
25	0	60	360	960	1920	0	48.0	28.8	30.7	30.7
35	0	80	400	1120	2540	0	45.7	22.9	25.6	29.0
50	0	80	560	1600	3260	0	32.0	22.4	24.6	26.1
65	0	120	940	1920	4240	0	37.0	29.0	23.6	26.1
75	0	120	1080	2380	4740	0	32	28.8	25.4	25.3
100	0	180	1420	3320	5960	0	36	28.4	26.6	23.8

Tabell 12: *Till vänster i tabellen presenteras förändring av volym sött vatten i marken, dvs vatten med en saltkoncentration mindre än 1$\frac{kg}{m^3}$. Dessa är samma siffror som visualiseras i figur 39. Till höger i tabellen ses en procentuell andel, denna andel är den totala volymen ökat dricksvatten jämfört med total volym uttaget salt vatten, för denna beräkning har en genomsnittlig porositet på 0.22 antagits för hela markvolymen innehållande dricksvatten. Under dessa simuleringar sker både ett saltvatten uttag och ett sötvattenuttag på 75$\frac{m^3}{år}$.*

	Volymökning sötvatten					Volymökning sötvatten/Utpumpat saltvatten				
Salt pumpflöde [$\frac{m^3}{år}$]	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år	Initialt	1 år	10 år	25 år	50 år
			[m^3]					[%]		
0	0	-80	-320	-1320	-2240	0	-	-	-	-
5	0	-40	-240	-1060	-1980	0	-160.0	-96.0	-169.6	-158.4
10	0	-40	-120	-700	-1380	0	-80.0	-24.0	-56.0	-55.2
15	0	-20	-80	-580	-1060	0	26.7	-10.7	-30.9	-28.3
20	0	0	-60	-440	-540	0	0	-6	-17.6	-10.8
25	0	0	-10	-280	-340	0	0	-0.8	-8.7	-5.4
35	0	40	20	140	380	0	22.9	1.1	3.2	4.34
50	0	80	340	640	1380	0	32.0	13.6	10.2	11.0
65	0	100	540	1320	2060	0	30.8	16.6	16.2	12.7
75	0	120	700	1780	2580	0	32	18.7	19.0	13.8
100	0	120	1220	2560	3880	0	24	24.4	20.5	15.5

Nedan presenteras några av de viktigaste beräkningarna gjorda i MATLAB för plats 2. Fullständig kod för plats 2 och motsvarande för plats 1 finns att tillgå vid intresse.

```
%Inital volym dricksvatten
Initial_vol = 282600; %Initial vol drickbart
Cell_vol = 2*1*10; %Volym cell [m3]
Tot_no_cells = 25782; %Total number active cells

%Sw0_Sa0
Vol_Sw0_Sa0_t1 = 283080; Vol_Sw0_Sa0_t10 = 285800; Vol_Sw0_Sa0_t25 = ...
    290520; Vol_Sw0_Sa0_t50 = 301320;
Vol_Sw0_Sa0 = [Vol_Sw0_Sa0_t1 Vol_Sw0_Sa0_t10 Vol_Sw0_Sa0_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa0_t50];

%Sw0_Sa5
Vol_Sw0_Sa5_t1 = 283100; Vol_Sw0_Sa5_t10 = 285840; Vol_Sw0_Sa5_t25 = ...
    290680; Vol_Sw0_Sa5_t50 = 301800;
Vol_Sw0_Sa5 = [Vol_Sw0_Sa5_t1 Vol_Sw0_Sa5_t10 Vol_Sw0_Sa5_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa5_t50];
%Sw0_Sa10
Vol_Sw0_Sa10_t1 = 283120; Vol_Sw0_Sa10_t10 = 285860; Vol_Sw0_Sa10_t25 = ...
    290860; Vol_Sw0_Sa10_t50 = 302280;
Vol_Sw0_Sa10 = [Vol_Sw0_Sa10_t1 Vol_Sw0_Sa10_t10 Vol_Sw0_Sa10_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa10_t50];
%Sw0_Sa15
Vol_Sw0_Sa15_t1 = 283140; Vol_Sw0_Sa15_t10 = 285920; Vol_Sw0_Sa15_t25 = ...
    290940; Vol_Sw0_Sa15_t50 = 302520 ;
Vol_Sw0_Sa15 = [Vol_Sw0_Sa15_t1 Vol_Sw0_Sa15_t10 Vol_Sw0_Sa15_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa15_t50];
%Sw0_Sa20
Vol_Sw0_Sa20_t1 = 283140; Vol_Sw0_Sa20_t10 = 286000; Vol_Sw0_Sa20_t25 = ...
    291160; Vol_Sw0_Sa20_t50 = 302820;
Vol_Sw0_Sa20 = [Vol_Sw0_Sa20_t1 Vol_Sw0_Sa20_t10 Vol_Sw0_Sa20_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa20_t50];
%Sw0_Sa25
Vol_Sw0_Sa25_t1 = 283140; Vol_Sw0_Sa25_t10 = 286160; Vol_Sw0_Sa25_t25 = ...
    291480; Vol_Sw0_Sa25_t50 = 303240;
Vol_Sw0_Sa25 = [Vol_Sw0_Sa25_t1 Vol_Sw0_Sa25_t10 Vol_Sw0_Sa25_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa25_t50];
%Sw0_Sa35
Vol_Sw0_Sa35_t1 = 283160; Vol_Sw0_Sa35_t10 = 286200; Vol_Sw0_Sa35_t25 = ...
    291640; Vol_Sw0_Sa35_t50 = 303860;
Vol_Sw0_Sa35 =[Vol_Sw0_Sa35_t1 Vol_Sw0_Sa35_t10 Vol_Sw0_Sa35_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa35_t50];
%Sw0_Sa50
Vol_Sw0_Sa50_t1 = 283160; Vol_Sw0_Sa50_t10 = 286360; Vol_Sw0_Sa50_t25 = ...
    292120; Vol_Sw0_Sa50_t50 = 304580;
Vol_Sw0_Sa50 =[Vol_Sw0_Sa50_t1 Vol_Sw0_Sa50_t10 Vol_Sw0_Sa50_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa50_t50];
%Sw0_Sa65
Vol_Sw0_Sa65_t1 = 283200; Vol_Sw0_Sa65_t10 = 286740; Vol_Sw0_Sa65_t25 = ...
    292440; Vol_Sw0_Sa65_t50 = 305560;
Vol_Sw0_Sa65 =[Vol_Sw0_Sa65_t1 Vol_Sw0_Sa65_t10 Vol_Sw0_Sa65_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa65_t50];
```

```
%Sw0_Sa75 S?TINTR?NGNING
Vol_Sw0_Sa75_t1 = 283200; Vol_Sw0_Sa75_t10 = 286880; Vol_Sw0_Sa75_t25 = ...
    292900; Vol_Sw0_Sa75_t50 = 306060;
Vol_Sw0_Sa75 =[Vol_Sw0_Sa75_t1 Vol_Sw0_Sa75_t10 Vol_Sw0_Sa75_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa75_t50];
%Sw0_Sa100 S?TINTR?NGNING
Vol_Sw0_Sa100_t1 = 283260; Vol_Sw0_Sa100_t10 = 287220; ...
    Vol_Sw0_Sa100_t25 = 293840; Vol_Sw0_Sa100_t50 = 307280;
Vol_Sw0_Sa100 =[Vol_Sw0_Sa100_t1 Vol_Sw0_Sa100_t10 Vol_Sw0_Sa100_t25 ...
    Vol_Sw0_Sa100_t50];

%Sw75_Sa0
Vol_Sw75_Sa0_t1 = 283000; Vol_Sw75_Sa0_t10 = 285480; Vol_Sw75_Sa0_t25 = ...
    289200; Vol_Sw75_Sa0_t50 = 299080;
Vol_Sw75_Sa0 = [Vol_Sw75_Sa0_t1 Vol_Sw75_Sa0_t10 Vol_Sw75_Sa0_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa0_t50];
%Sw75_Sa5
Vol_Sw75_Sa5_t1 = 283040; Vol_Sw75_Sa5_t10 = 285560; Vol_Sw75_Sa5_t25 = ...
    289460; Vol_Sw75_Sa5_t50 = 299340;
Vol_Sw75_Sa5 = [Vol_Sw75_Sa5_t1 Vol_Sw75_Sa5_t10 Vol_Sw75_Sa5_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa5_t50];
%Sw75_Sa10
Vol_Sw75_Sa10_t1 = 283040; Vol_Sw75_Sa10_t10 = 285680; ...
    Vol_Sw75_Sa10_t25 = 289820; Vol_Sw75_Sa10_t50 = 299940;
Vol_Sw75_Sa10 = [Vol_Sw75_Sa10_t1 Vol_Sw75_Sa10_t10 Vol_Sw75_Sa10_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa10_t50];
%Sw75_Sa15
Vol_Sw75_Sa15_t1 = 283060; Vol_Sw75_Sa15_t10 =  285720; ...
    Vol_Sw75_Sa15_t25 = 289940; Vol_Sw75_Sa15_t50 = 300260;
Vol_Sw75_Sa15 = [Vol_Sw75_Sa15_t1 Vol_Sw75_Sa15_t10 Vol_Sw75_Sa15_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa15_t50];
%Sw75_Sa20
Vol_Sw75_Sa20_t1 = 283080; Vol_Sw75_Sa20_t10 = 285740; ...
    Vol_Sw75_Sa20_t25 = 290080; Vol_Sw75_Sa20_t50 = 300780;
Vol_Sw75_Sa20 = [Vol_Sw75_Sa20_t1 Vol_Sw75_Sa20_t10 Vol_Sw75_Sa20_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa20_t50];
%Sw75_Sa25
Vol_Sw75_Sa25_t1 = 283080; Vol_Sw75_Sa25_t10 = 285790; ...
    Vol_Sw75_Sa25_t25 = 290240; Vol_Sw75_Sa25_t50 = 300980;
Vol_Sw75_Sa25 = [Vol_Sw75_Sa25_t1 Vol_Sw75_Sa25_t10 Vol_Sw75_Sa25_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa25_t50];
%Sw75_Sa35
Vol_Sw75_Sa35_t1 = 283120; Vol_Sw75_Sa35_t10 = 285820; ...
    Vol_Sw75_Sa35_t25 = 290660; Vol_Sw75_Sa35_t50 = 301700;
Vol_Sw75_Sa35 = [Vol_Sw75_Sa35_t1 Vol_Sw75_Sa35_t10 Vol_Sw75_Sa35_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa35_t50];
%Sw75_Sa50
Vol_Sw75_Sa50_t1 = 283160; Vol_Sw75_Sa50_t10 = 286140; ...
    Vol_Sw75_Sa50_t25 = 291160; Vol_Sw75_Sa50_t50 = 302700;
Vol_Sw75_Sa50 = [Vol_Sw75_Sa50_t1 Vol_Sw75_Sa50_t10 Vol_Sw75_Sa50_t25 ...
    Vol_Sw75_Sa50_t50];
%Sw75_Sa65
Vol_Sw75_Sa65_t1 = 283180; Vol_Sw75_Sa65_t10 = 286340; ...
    Vol_Sw75_Sa65_t25 = 291840; Vol_Sw75_Sa65_t50 = 303380;
```

```
67 Vol_Sw75_Sa65 = [Vol_Sw75_Sa65_t1 Vol_Sw75_Sa65_t10 Vol_Sw75_Sa65_t25 ...
       Vol_Sw75_Sa65_t50];
68 %Sw75_Sa75
69 Vol_Sw75_Sa75_t1 = 283200; Vol_Sw75_Sa75_t10 = 286500; ...
       Vol_Sw75_Sa75_t25 = 292300; Vol_Sw75_Sa75_t50 = 303900;
70 Vol_Sw75_Sa75 = [Vol_Sw75_Sa75_t1 Vol_Sw75_Sa75_t10 Vol_Sw75_Sa75_t25 ...
       Vol_Sw75_Sa75_t50];
71 %Sw75_Sa100 S?TINTR?NGNING
72 Vol_Sw75_Sa100_t1 = 283200; Vol_Sw75_Sa100_t10 = 287020; ...
       Vol_Sw75_Sa100_t25 = 293080; Vol_Sw75_Sa100_t50 = 305200;
73 Vol_Sw75_Sa100 = [Vol_Sw75_Sa100_t1 Vol_Sw75_Sa100_t10 ...
       Vol_Sw75_Sa100_t25 Vol_Sw75_Sa100_t50];
74
75 %% Prep plots and table
76
77 Adjust = Vol_Sw0_Sa0 - Initial_vol; %error adjustment volume
78 porvolym_plats2 = 0.2; %approximate porosity saltlayer site 2
79 X_yrs = [0,1,10,25,50]; %Timeaxis, years
80
81 Table_salt = [([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa5-Adjust]-Initial_vol);([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa10-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa15-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa20-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa25-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa35-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa50-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa65-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa75-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw0_Sa100-Adjust]-Initial_vol)];
82 Table_75 = [([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa0-Adjust]-Initial_vol);([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa5-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa10-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa15-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa20-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa25-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa35-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa50-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa65-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa75-Adjust]-Initial_vol); ([Initial_vol ...
       Vol_Sw75_Sa100-Adjust]-Initial_vol)];
83
84 Table_percent_salt = zeros(size(Table_salt)); %Calc percent increased ...
       volume drinkable water compared to volume pumped saltwater. Only salt
85 Table_percent_salt(1,:) = 5; Table_percent_salt(2,:) = 10; ...
       Table_percent_salt(3,:) = 15; Table_percent_salt(4,:) = 20; ...
       Table_percent_salt(5,:) = 25; Table_percent_salt(6,:) = 35; ...
       Table_percent_salt(7,:) = 50; Table_percent_salt(8,:) = 65; ...
       Table_percent_salt(9,:) = 75; Table_percent_salt(10,:) = 100;
86 Table_percent_salt(:,1) = 0; Table_percent_salt(:,2) = ...
       Table_percent_salt(:,2)*1; Table_percent_salt(:,3) = ...
       Table_percent_salt(:,3)*10; Table_percent_salt(:,4) = ...
       Table_percent_salt(:,4)*25; Table_percent_salt(:,5) = ...
```

```
      Table_percent_salt(:,5)*50;
87 Table_percent_salt = ...
      ((Table_salt.*porvolym_plats2)./Table_percent_salt)*100;
88
89
90 Table_percent_75 = zeros(size(Table_75)); %Calc percent increased ...
      volume drinkable water compared to volume pumped saltwater. Salt and ...
      sweet
91 Table_percent_75(1,:) = 0; Table_percent_75(2,:) = 5; ...
      Table_percent_75(3,:) = 10; Table_percent_75(4,:) = 15; ...
      Table_percent_75(5,:) = 20; Table_percent_75(6,:) = 25; ...
      Table_percent_75(7,:) = 35; Table_percent_75(8,:) = 50; ...
      Table_percent_75(9,:) = 65; Table_percent_75(10,:) = 75;  ...
      Table_percent_75(11,:) = 100;
92 Table_percent_75(:,1) = 0; Table_percent_75(:,2) = ...
      Table_percent_75(:,2)*1; Table_percent_75(:,3) = ...
      Table_percent_75(:,3)*10; Table_percent_75(:,4) = ...
      Table_percent_75(:,4)*25; Table_percent_75(:,5) = ...
      Table_percent_75(:,5)*50;
93 Table_percent_75 = ((Table_75.*porvolym_plats2)./Table_percent_75)*100;
94
95
96 %% PLOT
97
98 close all
99
100 figure
101 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa5-Adjust]-Initial_vol))
102 hold on
103 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa10-Adjust]-Initial_vol))
104 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa15-Adjust]-Initial_vol))
105 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa20-Adjust]-Initial_vol))
106 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa25-Adjust]-Initial_vol))
107 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa35-Adjust]-Initial_vol))
108 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa50-Adjust]-Initial_vol))
109 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa65-Adjust]-Initial_vol))
110 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa75-Adjust]-Initial_vol))
111 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw0_Sa100-Adjust]-Initial_vol))
112 title('F?r?ndring markvolym dricksvatten. Endast saltvattenuttag.')
113 xlabel('Tid [?r]')
114 ylabel('Volym [m3]')
115 legend('5m3/?r', '10m3/?r', '15m3/?r', '20m3/?r', '25m3/?r', '35m3/?r', ...
      '50m3/?r', '65m3/?r', '75m3/?r', '100m3/?r' )
116 hold off
117
118 figure
119 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa0-Adjust]-Initial_vol));
120 hold on
121 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa5-Adjust]-Initial_vol));
122 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa10-Adjust]-Initial_vol));
123 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa15-Adjust]-Initial_vol));
124 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa20-Adjust]-Initial_vol));
125 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa25-Adjust]-Initial_vol));
126 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa35-Adjust]-Initial_vol));
```

```
127 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa50-Adjust]-Initial_vol));
128 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa65-Adjust]-Initial_vol));
129 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa75-Adjust]-Initial_vol));
130 plot(X_yrs, ([Initial_vol Vol_Sw75_Sa100-Adjust]-Initial_vol));
131 title('F?r?ndring markvolym dricksvatten. S?tvattenuttag 75m3/?r')
132 xlabel('Tid [?r]')
133 ylabel('Volym [m3]')
134 legend('0m3/?r', '5m3/?r', '10m3/?r', '15m3/?r', '20m3/?r', '25m3/?r', ...
       '35m3/?r', '50m3/?r', '65m3/?r','75m3/?r', '100m3/?r')
135 hold off
```

```
1  %% Tider saltintrsion
2
3  %Sw150
4  tid_Sw150_Sa0 = 123900968; tid_Sw150_Sa15 = 149373616; tid_Sw150_Sa25 = ...
       152799536; tid_Sw150_Sa35 = 156619536; tid_Sw150_Sa50 = 188005536; ...
       tid_Sw150_Sa65 = 252015920; tid_Sw150_Sa75 = 787977856; ...
       tid_Sw150_Sa100 = 884000000;
5  tid_Sw150 = [tid_Sw150_Sa0, tid_Sw150_Sa15, tid_Sw150_Sa25, ...
       tid_Sw150_Sa35, tid_Sw150_Sa50, tid_Sw150_Sa65, tid_Sw150_Sa75, ...
       tid_Sw150_Sa100];
6
7  %% Saltkoncentrationer
8
9  %Sweet150
10 Salt_Sw150_Sa0 = 7.8; Salt_Sw150_Sa15 = 5.45; Salt_Sw150_Sa25 = 3.75; ...
       Salt_Sw150_35 = 2.69; Salt_Sw150_50 = 1.58; Salt_Sw150_65 = 1.15; ...
       Salt_Sw150_75 = 1.01;  Salt_Sw150_100 = 0.853;
11 Salt_Sw150 = [Salt_Sw150_Sa0, Salt_Sw150_Sa15, Salt_Sw150_Sa25, ...
       Salt_Sw150_35, Salt_Sw150_50, Salt_Sw150_65, Salt_Sw150_75, ...
       Salt_Sw150_100];
12
13 %Sweet200 ORIMLIGT
14 Salt_Sw200_Sa0 = 5.9; Salt_Sw200_Sa20 = 5.9; Salt_Sw200_Sa35 = 5.9; ...
       Salt_Sw200_Sa50 = 5.9; Salt_Sw200_Sa75 = 5.9; Salt_Sw200_Sa100 = 4.6;
15 Salt_Sw200 = [Salt_Sw200_Sa0, Salt_Sw200_Sa20, Salt_Sw200_Sa35, ...
       Salt_Sw200_Sa50, Salt_Sw200_Sa75, Salt_Sw200_Sa100];
16
17 %% Saltintrusion saltpumpning
18
19 Y_flow=[0, 15, 25, 35, 50, 65, 75]; %Salt pump flows
20
21 x1_tid=[tid_Sw150(1:end-1)/(60*60*24)]; %Time for saltintrusion
22
23 %% Kvot Salt/sweet mot maximal saltkonc
24
25 Kvot_Sw150 = [0/150, 15/150, 25/150, 35/150, 50/150, 65/150, 75/150, ...
       100/150];
26
27 Y_Salt = [Salt_Sw150]';
28 X_Kvot = [Kvot_Sw150*100]';
29
```

```
30 %% Fit curve
31
32 [f,gof] = fit(x1_tid',Y_flow','exp2'); %Fit time for saltintrusion
33 [f_2,gof_2] = fit(X_Kvot, Y_Salt, 'exp2'); %Fit ...
      pumpflowrelationAnpassning against koncentration
34
35 %% Plot
36
37 close all
38
39 figure
40 plot(x1_tid, Y_flow, 'bx')
41 hold on
42 plot(f)
43 xlabel('Tid [d]')
44 ylabel('Pumpfl?de [m3/?r]')
45 legend('Simulerad Saltvattenintr?ngningstid', 'Anpassad kurva')
46 hold off
47
48 figure
49 plot(X_Kvot, Y_Salt, 'bx')
50 hold on
51 plot(f_2)
52 xlabel('Andel saltvattenuttag per s?tvattenuttag [%]')
53 ylabel('Koncentration [kg/m3]')
54 legend('150m3/?r', 'Anpassad kurva')
55 hold off
```

```
1 %% Stressperiod i sekunder
2
3 Stress = zeros(200,3); %Skapar grundmatris
4 Stress_length = 365/2*24*60*60; %l?ngd p? en stressperiod i sekunder
5
6 Stress(1:2:end,2) = Stress_length; %Length
7 Stress(2:2:end,2) = 1;
8 Stress(1:2:end,3) = 40; %Time steps
9 Stress(2:2:end,3) = 5; %Time steps
10
11 for i = 0:2:length(Stress)-1
12     Stress(i+1,1:2) = [Stress_length*i/2+1,Stress_length]; %skapar ...
          stegl?ngd
13     Stress(i+2,1) = Stress_length + Stress(i+1)-1; %skapar kumulativ ...
          tidsstege
14 end
15
16 Stress(1,1)=0; %Fixxar initialvillkor
17
18 %% RCH Multiplier/Use previous
19
20 RCH_Multiplier = zeros(200,3);
21 RCH_Multiplier(4:4:end,3) = 20; %for pumps
22
```

```
23 for k = 4:4:length(RCH_Multiplier)
24     RCH_Multiplier(k:k+1,1)=2;
25 end
26 RCH_Multiplier(1,1)=2;
27 RCH_FIX = zeros(1,183);
28
29 %% Wells
30
31 Well_Salt = zeros(200,2); %Grundmatris saltvattenpumpning
32 Well_Sweet = zeros(200,2); %Grundmatris s?tvattenpumpning
33
34 Well_Salt(:,1) = Stress(1:end,1); %Anger tidsperioder f?r pumpning
35 for j=1:4:length(Well_Salt)-1
36 Well_Salt(j,2) = -4.12e-6; %Anger pumpflow salt
37 end
38
39 Well_Sweet(:,1) = Stress(1:end,1);
40 for l=1:4:length(Well_Sweet)-1
41 Well_Sweet(l+2,2) = -3.17e-7; %Anger pumpflow sweet
42 end
43
44 format long
45 csvwrite('Sweet_Test.csv',Well_Sweet); %kom ih?g att kopiera in ...
       decimalettan manuellt
46 csvwrite('Salt_Test.csv',Well_Salt);
```