



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 14041

Examensarbete 30 hp
Oktober 2014

Hydraulisk och termisk grundvattenmodellering av ett geoenergilager i Stockholmsåsen

Carolin Landström

REFERAT

Hydraulisk och termisk grundvattenmodellering av ett geoenergilager i Stockholmsåsen

Carolin Landström

Geoenergi kan utvinnas från ett akviferlager där grundvatten används som värmeväxlande medium medan värmen och kylan lagras i omgivande material i akviferen samt till viss del i grundvattnet. Tillämpning av akviferlager för utnyttjande av geoenergi används främst i storskaliga anläggningar och är begränsat till platser med lämpliga akviferer i form av rullstensåsar, sandstens- och kalkstensakviferer. Löwenströmska sjukhuset i Upplands Väsby kommun norr om Stockholm är ett sjukhus som ligger inom det norra stråket av Stockholmsåsen. Detta gör att det kan vara lönsamt och miljömässigt fördelaktigt för sjukhuset att undersöka möjligheterna avseende ett akviferlager i åsmaterialet intill fastigheten.

Syftet med examensarbetet har varit att utreda om ett geoenergilager med säsongslagring av värme och kyla kan appliceras inom Löwenströmskas fastighetsområde med hjälp av grundvattenmodellering. En hydraulisk grundvattenmodell byggdes upp i MODFLOW utifrån en förenklad konceptuell tolkning av grundvattensystemet. Den hydrauliska grundvattenmodellen kalibrerades och verifierades mot observerade grundvattennivåer innan och efter en propumpning som gjorts. Den hydrauliska grundvattenmodellen användes sedan för att implementera ett fiktivt geoenergilager med MT3DMS. MT3DMS är en modul som används med MODFLOW och som genom modifieringar av inparametrarna kan simulera värmetransport.

Resultatet visar att geoenergilagret kan säsongslagra värme och kyla om ca 4 GWh, vilket täcker 85 % av Löwenströmskas värmebehov med ett värmepumpsystem med en antagen SP-faktor på 4 samt hela kylbehovet. För att täcka 50 % av toppvärmeeffekten beräknas uttaget behöva vara 63 l/s, vilket enligt modellen är möjligt att ta ut och återinfiltrera. Geoenergilagret behöver inte vara helt i energibalans, då grundvattenmagasinet återladdas med sin naturliga grundvattentemperatur. Brunnarnas placering har betydelse för vilka flöden som behövs för att skapa energibalans. En alltför tät placering av brunnarna leder till ett termiskt genomslag. Den hydrauliska konduktiviteten hos åsmaterialet påverkar hur mycket energi kan som kan lagras. En högre hydraulisk konduktivitet ger större energiförluster och en lägre hydraulisk konduktivitet gynnar energilagringen, men ger större avsänkningar och nivåökningar till följd av pumpningen. Porositetens betydelse för energilagringen har i modellen påvisats vara minimal.

En rad antaganden har gjorts vid modellbyggandet av den hydrogeologiska modellen och ytterligare undersökningar angående åsens geologiska och hydrogeologiska förhållanden är önskvärda för att förbättra modellen.

Nyckelord: Akviferlager, MODFLOW, MT3DMS, geoenergilager, hydraulisk och termisk grundvattenmodellering

*Institutionen för geovetenskaper; Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet
Geocentrum, Villavägen 16, SE 75236 Uppsala. ISSN 1401-5765*

ABSTRACT

Hydraulic and thermal groundwater modelling of a geothermal energy system in the Stockholm esker

Carolin Landström

Geothermal energy can be extracted from an aquifer, where the groundwater is used as heat exchange medium while heat and cold are stored in the surrounding material in the aquifer and to some extent in the groundwater. Application of aquifer storage for the use of geothermal energy is mainly used in large scale facilities and is limited to sites with suitable aquifers in the form of ridges, sandstone and limestone aquifers.

Löwenströmska hospital in the municipality of Upplands Väsby, north of Stockholm, is located nearby the northern part of the Stockholm esker. This means that it can be profitable and environmentally beneficial for the hospital to examine the possibilities of aquifer storage in the esker material next to its property.

The purpose of this master thesis has been to investigate if geothermal energy storage with a seasonal storage of heat and cold can be applied within Löwenströmska hospital's property area using groundwater modeling. A hydraulic groundwater model was constructed in MODFLOW based on a simplified conceptual model of the groundwater system. The hydraulic groundwater model was calibrated and validated against observed groundwater levels before and after a pumping test. The hydraulic groundwater model was then used to implement a fictitious geothermal energy storage with MT3DMS. MT3DMS is a modular function used with MODFLOW, which can be modified to simulate heat transport.

The result shows that the geothermal energy storage can store seasonal heating and cooling of about 4 GWh, which covers 85 % of the hospital's heating demand with an assumed SP-factor of 4, and the entire cooling demand. To cover 50 % of the peak heating power it was calculated that a flow of 63 l/s was needed, and according to the model this is possible. The geothermal energy storage does not need to be completely in energy balance, since the aquifer is recharged with its natural groundwater. The location of the wells influences which flows that are needed to create energy balance. A too close placement of the wells leads to a thermal breakthrough. The hydraulic conductivity of the esker material affects the amount of energy that can be stored. A higher hydraulic conductivity provides greater energy losses and a lower hydraulic conductivity favors the energy storage but gives a greater influence area.

A number of assumptions have been made in the model construction of the hydrogeological model and further investigation of the geological and hydrogeological conditions are desirable to improve the model.

Keywords: Aquifer thermal energy storage, MODFLOW, MT3DMS, hydraulic and thermal groundwater modeling

*Department of Earth Sciences; Air, Water and Landscape Sciences, Uppsala University
Geocentrum, Villavägen 16, SE 752 36 Uppsala. ISSN 1401-5765*

FÖRORD

Detta examensarbete är det avslutande momentet på Civilingenjörsprogrammet i Miljö-och Vattenteknik vid Uppsala Universitet och omfattar 30 hp. Examensarbetet har utförts på vattenresursgruppen på Sweco Environment i Stockholm.Handledare har varit Anna Lundgren, Sweco Environment och ämnesgranskare har varit Fritjof Fagerlund, geologiska institutionen i Uppsala.

Jag vill tacka min handledare Anna som hjälpt mig med att få examensarbetet att träda i kraft och för den hjälp jag fått med den hydrauliska modelleringen samt bra synpunkter på rapporten. Tack till samtliga på vattenresursgruppen varav alla har hjälpt mig på ett eller annat sätt med examensarbetet och gett mig en lärorik och trivsamtid på Sweco. Ett särskilt tack till Micke och Iuliia som tagit sig tid och varit tålmodiga när jag har behövt hjälp och inte förstått mig på geoenergidelen. Fritjof vill jag också tacka för den stora stöd och uppmuntran han har gett mig under arbetets gång, vilket har varit mycket värdefullt.

Sist men inte minst tack till mina vänner och min familj som har funnits vid min sida även om jag tjatatsönder öronen på dem om mitt examensarbete.

Stockholm, 2014

Carolin Landström

Copyright © Carolin Landström och Institutionen för geovetenskaper; Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet.

UPTEC W 14041, ISSN 1401-5765.

Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet, Uppsala, 2014.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Hydraulisk och termisk grundvattenmodellering av ett geoenergilager i Stockholmsåsen

Carolin Landström

Framtidens energiförsörjningssystem kommer till stor del att bestå av förnyelsebara energislag som klarar efterfrågan på värme och kyla samt de miljökrav som ställs. Geoenergi kommer att vara ett av dessa, då geoenergilösningars främsta fördelar är att de är ekonomiskt gynnsamma, miljövänliga och ger möjlighet att säsongslagra stora mängder av värme och kyla. Geoenergi kan utvinnas från ett grundvattenmagasin där grundvatten används som värmeväxlande medium medan värmen lagras i omgivande material i marken samt till viss del i grundvattnet. Grundvatten pumpas då via brunnar från grundvattenmagasinet till en energianläggning där energin förs över till användaren via en värmeväxlare. Om energin ska användas för att t.ex. kyla en anläggning, pumpas kallt grundvatten upp som efter värmväxlaren bär med sig energi i form av värme. Det uppvärmda vattnet pumpas tillbaka i en annan del av grundvattenmagasinet. När värmebehov finns vänder man på systemet och grundvatten pumpas då upp från den varma delen av grundvattenmagasinet där värmen har lagrats. Efter värmväxling återförs det nerkylda grundvattnet i den kalla delen. En varm och en kall sida uppstår i grundvattenmagasinet som skiljs av med en termisk front. Denna front kommer att röra sig bort från brunnarna när grundvatten pumpas ned och in mot brunnarna när grundvatten pumpas upp. Tillämpning av ett grundvattenmagasin för utnyttjande av geoenergi används främst i storskaliga anläggningar och är begränsat till platser med lämpliga grundvattenmagasin i form av rullstensåsar, sandstens- och kalkstensmagasin.

Många sjukhus har under de senaste åren sett över sina energilösningar, och i de fall det är utförbart undersöks möjligheterna att täcka sjukhusens behov av värme och kyla genom uppförande och implementering av ett geoenergilager. Löwenströmska sjukhuset i Upplands Väsby kommun norr om Stockholm ligger i närheten av det norra stråket av Stockholmsåsen. Detta gör att det kan vara lönsamt och miljömässigt fördelaktigt för sjukhuset att undersöka möjligheterna avseende ett geoenergilager i åsmaterialet inom sjukhusets fastighetsgräns.

Syftet med examensarbetet var att utreda om ett geoenergilager med säsongslagring av värme och kyla är möjligt att applicera i den del av Stockholmsåsen som ligger intill Löwenströmska sjukhuset. För att göra detta konstruerades en hydraulisk grundvattenmodell, vilken är en förenklad bild av det mer komplexa verkliga grundvattensystemet. Den hydrauliska grundvattenmodellen användes sedan för att implementera ett fiktivt geoenergilager i form av en varm och en kall brunn för utvinning av värme respektive kyla. Målet med modelleringen var att se om värme och kyla kunde lagras i åsen med hänsyn till Löwenströmska sjukhusets energi- och effektbehov med en given placering av brunnarna och deras flöden.

För säsongslagring av värme och kyla i ett grundvattenmagasin brukar man tala om energibalanserade system, där den upptagna och nedförda värmemängden behöver vara ungefär lika stor. I ett obalanserat system kommer medeltemperaturen i grundvattenmagasinet att sjunka eller stiga beroende på om för mycket eller för lite värme tas upp. Om medeltemperaturen för värme sjunker för varje år kommer grundvattnet till slut inte kunna användas för uppvärmningsändamål. På motsvarande sätt kommer grundvattnet från den kalla

sidan inte kunna användas för kylning om medeltemperaturen succesivt höjs. Under vinterdriften sänks medeltemperaturen i och med att värme tas upp och under sommardriften höjs medeltemperaturen då värme återladdas. För att förhindra en successiv uppvärmning eller nedkylning av grundvattenmagasinet eftersträvas en stabil medeltemperatur i grundvattenmagasinet på båda sidor. En del av undersökningen var därför att hitta ett geoenergilager i energibalans.

Efter att ett geoenergilager modellerats till energibalans testades andra pumplägen och flöden för att se hur det påverkar energilagringen. Det undersöktes även hur stora nivåökningar och avsänkningar av grundvattenytan det blev i omgivningen till följd av uttag och återförande av grundvatten. För att bygga ett geoenergilager i ett grundvattenmagasin krävs tillstånd från miljödomstolen. Sker det alltför stora avsänkningar eller nivåökningar till följd av pumpningen har andra markägare inom påverkansområdet rätt att ha invändningar mot ett tillstånd. För att undersöka hur den hydrauliska grundvattenmodellens egenskaper påverkar det fiktiva geoenergilagret gjordes en känslighetsanalys över åsmaterialets genomsläpplighet och porositet.

Studiens resultat visar på att ett geoenergilager i åsmaterialet intill Löwenströmska sjukhusets fastighet kan säsongslagra värme och kyla om ca 4 GWh, vilket täcker 85 % av Löwenströmskas värmebehov samt hela kylbehovet. För att geoenergilagret ska stå för 85 % av värmebehovet säger en tumregel att detta kan uppnås om 50 % av toppvärmeeffekten täcks. För att täcka 50 % av toppvärmeeffekten beräknas uttaget behöva vara 63 l/s, vilket enligt modellen är möjligt att ta ut och återinfiltrera. Vilka brunnslägen och flöden som används har betydelse för energilagringen. En alltför nära placering av brunnarna leder till att ett termiskt genomslag uppstår där den varma brunnen tar upp kallare vatten än den naturliga grundvattentemperaturen och den kalla brunnen tar upp varmare vatten än den naturliga grundvattentemperaturen. Eftersom grundvattenmagasinet återladdas med sin naturliga grundvattentemperatur behöver inte geoenergilagret vara helt i energibalans. Mer energi kan därmed urladdas än återladdas, d.v.s. mer värme kan utvinnas än kyla.

Genomsläppligheten hos åsmaterialet påverkar hur mycket energi som kan lagras. En hög genomsläpplighet missgynnar energilagringen och en låg genomsläpplighet gynnar energilagringen, men ger större avsänkningar och nivåökningar till följd av pumpningen. Porositetens betydelse för energilagringen har i modellen påvisats vara minimal.

Den hydrauliska modellen är byggd på en rad förenklingar, men kan ändå anses användbar till att ge en bedömning av hur mycket energi som kan lagras. Ytterligare undersökningar angående geologi och hydrogeologi är önskvärda för att på ett mer korrekt sätt förstå hur grundvattensystemet fungerar.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND.....	1
1.2 MÅL OCH SYFTE.....	1
1.2.1 Avgränsningar.....	2
2. TEORI	3
2.1 SÄSONGSLAGRING AV ENERGI I EN AKVIFER.....	3
2.1.1 Energibalanserade system.....	4
2.1.2 Tillståndsförförande av ett akviferlager.....	5
2.2 GRUNDVATTENSTRÖMNING	5
2.3 VÄRMETRANSPORT I GRUNDVATTENMAGASIN.	6
2.3.1 Värmeledning.....	6
2.3.2 Konvektiv värmetransport.....	7
3. MODELLTEORI	8
3.1 NUMERISK MODELL - MODFLOW.....	8
3.2 VÄRMETRANSPORT MED MT3DMS.....	9
4. MATERIAL OCH METODER	12
4.1 OMRÅDESBESKRIVNING.....	12
4.2 KONCEPTUELL MODELL.....	12
4.2.1 Geologiska förhållanden inom modellområdet.....	13
4.2.2 Geohydrauliska förhållanden inom modellområdet.....	14
4.3 NUMERISK GRUNDVATTENMODELLERING	15
4.3.1 Antaganden och avgränsningar för den numeriska modellen.....	15
4.3.2 Randvillkor	16
4.3.3 Uppbyggnad av hydraulisk numerisk modell	16
4.3.4 Kalibrering och verifiering av den numeriska modellen	20
4.4 MODELLERING AV FIKTIVT GEOENERGILAGER.....	21
4.4.1 Implementering med MT3DMS	22
4.4.2 Modellering av andra brunnslägen och flöden.....	24
4.4.3 Känslighetsanalys	25
5. RESULTAT	26
5.1 KALIBRERING OCH VERIFIERING AV DEN NUMERISKA GRUNDVATTENMODELLEN	26

5.2 FIKTIVT GEOENERGILAGER	27
5.2.1 Energibalanserat system.....	27
5.2.2 Avsänkning/nivåökning	29
5.2.3 Andra brunnslägen och flöden	29
5.2.4 Känslighetsanalys	32
6. DISKUSSION	38
6.1 DEN HYDRAULISKA MODELLEN	38
6.2 DET FIKTIVA GEOENERGILAGRET	38
7. SLUTSATS	41
8. REFERENSER.....	42
BILAGA – Hydrogeologiska parametervärden från litteraturen.....	45

1. INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Framtidens energiförsörjningssystem kommer till stor del att bestå av förnyelsebara energislag som klarar efterfrågan på värme och kyla samt de miljökrav som ställs. Geoenergi kommer att vara ett av dessa, då geoenergilösningars främsta fördelar är att de är ekonomiskt gynnsamma, miljövänliga och ger möjlighet att säsongslagra stora mängder av värme och kyla. Geoenergi kan utvinnas från ett akviferlager där grundvatten används som värmeväxlande medium medan värmen och kylan lagras i omgivande material i akviferen samt till viss del i grundvattnet. Grundvatten pumpas då via brunnar från akviferen till en energianläggning där energin förs över till användaren via en värmeväxlare. Om energin ska användas för att t.ex. kyla en anläggning, pumpas kallt grundvatten upp som efter värmväxlaren bär med sig energi i form av värme. Det varma grundvattnet infiltreras i en annan del av akviferen och en varm och en kall sida uppnås. När värmebehov finns vänder man på systemet och grundvatten pumpas då upp från den varma delen av akviferen och ner i den kalla delen efter värmeväxlaren. Akviferlager för utnyttjande av geoenergi tillämpas främst i storskaliga anläggningar och är begränsat till platser med lämpliga akviferer i form av rullstensåsar, sandstens- och kalkstensakviferer.

Många sjukhus har under de senaste åren sett över sina energilösningar, och i de fall det är utförbart undersöks möjligheterna att täcka sjukhusens behov av värme och kyla genom uppförande och implementering av ett akviferlager. Löwenströmska sjukhuset i Upplands Väsby kommun norr om Stockholm är ett sjukhus som ligger i närheten av det norra stråket av Stockholmsåsen. Detta gör att det kan vara lönsamt och miljömässigt fördelaktigt för sjukhuset att undersöka möjligheterna avseende ett akviferlager i åsmaterialet inom sjukhusets fastighetsgräns.

Modellering av ett geoenergilager i en akvifer görs för att se vilka temperaturer av grundvattnet som kan utvinnas när de varma eller kalla brunnarna används och för att avgöra vilket avstånd mellan brunnarna som krävs utan att allt för stort termiskt genomslag ska uppstå. Vilka temperaturer av grundvattnet som pumpas ned i respektive brunn bestäms i simuleringarna, medan vilka temperaturer av grundvattnet som pumpas upp beräknas i mjukvaran.

1.2 MÅL OCH SYFTE

Syftet med examensarbetet var att utreda om ett geoenergilager med säsongslagring av värme och kyla är möjligt att applicera i den del av Stockholmsåsen som ligger intill Löwenströmska sjukhuset. Ett delmål för att uppnå detta var att konstruera en hydraulisk grundvattenmodell för att kunna modellera ett fiktivt geoenergilager. Målet med modelleringen var att se om värme och kyla kunde lagras i åsen med hänsyn till Löwenströmska sjukhusets energi- och effektbehov med en given placering av brunnarna och deras flöden.

Ett geoenergilager modellerades till energibalans via en iterativ process och andra brunnspaceringar och flöden testades för att se hur energilagringen påverkades. Det

undersöktes även hur stora nivåökningar och avsänkningar av grundvattenytan det blev i omgivningen till följd av uttag och återförande av grundvatten. För att undersöka hur den hydrauliska grundvattenmodellens egenskaper påverkar det fiktiva geoenergilagret gjordes en känslighetsanalys över åsmaterialets hydrauliska konduktivitet och porositet.

1.2.1 Avgränsningar

Examensarbetet har inriktats på modellering av ett fiktivt geoenergilager på säsongsbasis och inte det energisystem som Löwenströmska sjukhuset använder sig av idag. För detta ändamål har grova antaganden gjorts. Modelleringen har inte tagit hänsyn till Löwenströmskas momentana behov av energi, utan den energi som potentiellt kan utvinnas har modellerats med medelflöden och medeltemperaturer.

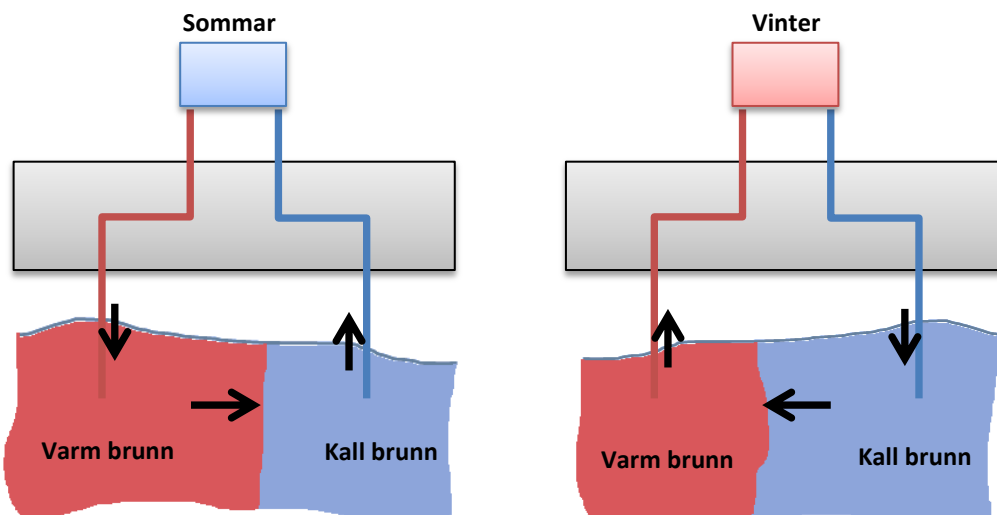
Målet med examensarbetet har inte varit att hitta ett optimalt fiktiv geoenergilager gällande brunnsplacering och flöden (pumpkapaciteter), utan ett valt energibalanserande system har iterativt modellerats fram och det är det som redovisas i rapporten.

Inga ekonomiska aspekter har undersökts huruvida det skulle vara ekonomiskt fördelaktigt för sjukhuset att använda sig av ett geoenergilager.

2. TEORI

2.1 SÄSONGSLAGRING AV ENERGI I EN AKVIFER

Grundprincipen för säsongslagring av energi i en akvifer är relativt enkel. Energilagringen bygger på att grundvatten pumpas runt från en brunnsgrupp till en annan i akviferen. I det allra enklaste fallet används två brunnar, en ”varm brunn” och en ”kall brunn”. Under sommaren uttas grundvatten från den kalla brunnen för utvinning av kyla och det uppvärmda vattnet återinfiltreras till akviferen via den varma brunnen. En volym av varmt grundvatten kommer då att lagras runt den varma brunnen. På vintern när värmebehov existerar vänds systemet. Det varma grundvattnet som lagrats under sommaren pumpas då upp från den varma brunnen, värme utvinns via värmeväxlare eller värmepump och det nedkylda grundvattnet pumpas åter ned i akviferen via den kalla brunnen (figur 1). En volym av kallare vatten lagras då runt den kalla brunnen som utnyttjas under sommaren (Probert, 1995). Då storleken på uttaget och återinfiltreringen är lika stora sker inget nettouttag av grundvatten (Hallström, 2011).



Figur 1. Schematisk bild över ett geoenergilagringssystem i en akvifer för sommar- och vinterdrift. Den termiska fronten rör sig mot uttagsbrunnen och bort från infiltrationsbrunnen.

Den varma och den kalla volymen hålls åtskilda av en termisk front. Denna front kommer att röra sig i en riktning bort från brunnarna vid infiltration och in mot brunnarna vid uttag (figur 1) (Andersson, i.d.). Avståndet mellan den kalla och den varma brunnen bör vara tillräckligt stort så att lagringsvolymerna hålls isär. Ett problem som annars kan uppstå är ett termiskt genomslag, d.v.s. att kallare vatten tas upp från den varma brunnen eller att varmare vatten tas upp från den kallare brunnen jämfört med den naturliga temperaturen. Ett visst termiskt genomslag kan dock vara acceptabelt (Hägg, 2014). Dimensionering och projektering av ett geoenergilagringssystem bygger därför bl.a. på lokaliseringen av pumpbrunnarna, flöden och injektionstemperaturerna (Probert, 1995).

Grundvattnet kan användas till förvärmning av ventilationsluft under vintern och för kylning under sommaren. Mer vanligt är att en värmepump används för utvinning av mer värme

(Andersson, i.d.). Om kyla och värme distribueras inom fastigheten med konventionell teknik (exempelvis via vätskeburna kylsystem till processkyla och komfortkyla samt via förvärmning av ventilationsluft, markvärme eller värmepumpsdrift) medger det en återföring av ca 16-gradigt vatten till varma brunnar sommartid och 4-gradigt vatten till kalla brunnar vintertid (Hägg, 2014). För utvinning av kyla behövs oftast ingen värmepumpsteknik då temperaturen hos energikällan redan är tillräckligt låg. Grundvattnets temperatur utnyttjas då direkt i kylsystemet efter värmeväxling, så kallad frikyla.

För termohydrauliska analyser behövs kunskap om grundvattenflödet och temperaturer i akviferen och omkringliggande mark. Det naturliga grundvattenflödet bör vara litet, då ett större grundvattenflöde försvårar lagringen av energi (Allmänna ingenjörsbyrån, 1978).

2.1.1 Energibalanserade system

För säsongslagring av värme och kyla i en akvifer brukar man tala om energibalanserade system, där den upptagna och nedförda värmemängden är lika stor. I ett obalanserat system kommer medeltemperaturen i akviferen att sjunka eller stiga beroende på om för mycket eller för lite värme tas upp. Om medeltemperaturen för värme sjunker för varje år kommer grundvattnet till slut inte kunna användas för uppvärmningsändamål. På motsvarande sätt kommer grundvattnet från den kalla sidan inte kunna användas för kylning om medeltemperaturen succesivt höjs. Under vinterdriften sänks medeltemperaturen i och med att värme tas upp och under sommardriften höjs medeltemperaturen då värme återladdas. För att förhindra en successiv uppvärmning eller nedkylning av akviferen eftersträvas en stabil medeltemperatur i akviferen på båda sidor (Propert, 1995).

Ett akviferlager dimensioneras bl.a. utifrån effekt- och energibehov hos fastigheten eller anläggningen. Behoven ligger till grund för hur mycket grundvatten som behöver omsättas och vilka temperaturer som krävs för respektive brunngrupp (Hallström, 2011).

Effekten av utvinning av värme eller kyla från grundvatten kan beräknas enligt ekvation 1 nedan (Hallström, 2011).

$$P_{grundvatten} = Q c_s \rho_w \Delta T \quad (1)$$

där $P_{grundvatten}$ = effekt [W], Q =vattenflöde [m^3s^{-1}], c_s = vattnets specifika värmekapacitet [$\text{Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$], ρ_w är vattnets densitet [kgm^{-3}] och ΔT är temperaturskillnaden i värmeväxlaren [°C].

För att höja temperaturen i värmekretsen används en värmepump som tillför högvärdig energi. Den nyttiga effekt, P_{nyttig} , som levereras till värmesystemet är därmed summan av effekten från grundvattnet, $P_{grundvatten}$, och effekten som tillförs värmepumpen, $P_{tillförd}$, för att höja temperaturen i värmekretsen (ekvation 2) (Hallström, 2011).

$$P_{nyttig} = P_{grundvatten} + P_{tillförd} \quad (2)$$

Förhållandet mellan den nyttiga och tillförda effekten benämns värmefaktor, även kallad COP (Coefficient of performance). Denna är ett mått på hur effektivt den tillförda högvärdiga

energin utnyttjas momentant. För ett medelvärde av värmefaktorn under ett år används SPF (Seasonal performance factor) (ekvation 3) (Hägg, 2014).

$$SPF = \frac{P_{nyttig}}{P_{tillförd}} \quad (3)$$

För att få mängden energi, E , multipliceras effekten med den tid, t , effektupptaget pågått (ekvation 4) (Hallström, 2011).

$$E = Pt \quad (4)$$

Värmebehovet för fastigheter varierar bl.a. med utomhustemperaturen. Det maximala effektbehovet inträffar endast en kort period under året. Ett värmepumpsystem dimensioneras ofta för att täcka 50 % av effektbehovet (Hägg, 2014). Om 50 % av effektbehovet täcks av värmepumpsystemet är en tumregel att ca 85 % av fastighetens energibehov täcks (Jonsson & Bohdanowicz, 2005).

2.1.2 Tillståndsförförande av ett akviferlager

För att bygga ett akviferlager behövs tillstånd för vattenverksamhet från Mark- och miljödomstolen enligt kapitel 11, Miljöbalken. Det krävs en teknisk beskrivning (TB) och en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) som beskriver den potentiella miljöpåverkan på omgivningen, inkluderat alla aspekter på miljö och hälsa (Andersson, i.d.).

Påverkansområdet definieras som det område inom vilket avsänkningar och nivåökningar av den ostörda grundvattennivån är större än 0,3 m. Lagen kräver även ett tidigt samråd med lokala myndigheter och markägare före den slutgiltiga tillståndsansökan. Markägare inom påverkansområdet anses vara aktörer som har rätt till invändningar mot en tillståndsansökan (Andersson, i.d.).

2.2 GRUNDVATTENSTRÖMNING

För att kunna beräkna energitransporten med grundvattenströmningen i en akvifer måste grundvattenflödet vara känt. Grundvattenflödet per areaenhet ges av Darcys lag (ekvation 5) (Claesson m.fl., 1982).

$$q_w = -\frac{k}{\mu}(\nabla P + \rho_w g \hat{z}) \quad (5)$$

där q_w är grundvattenflödet [m^3/s], k är permeabiliteten [m^2], μ är vattnets dynamiska viskositet [$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$], ∇P är tryckgradientvektorn, $[\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z}]$, ρ_w är vattnets densitet [kgm^{-3}], g är tyngdaccelerationen [ms^{-2}] och $\hat{z}$ är den uppåtriktade enhetsvektorn [-].

Om viskositetens och densitetens temperaturberoende försummas kan Darcys lag förenklas genom att införa den hydrauliska konduktiviteten, K , (ekvation 6) och den hydrauliska potentialen, h , som är summan av tryckpotentialen och lägespotentialen (ekvation 7) (Claesson m.fl., 1982)

$$K = \frac{k\rho_w g}{\mu} \quad (6)$$

$$h = \frac{P}{\rho_w g} + z \quad (7)$$

Införande av ovanstående ekvationer i ekvation 5 ger då grundvattenströmningen i vektorform, som alltid är från högre till lägre hydraulisk potential (ekvation 8).

$$q_w = -K\nabla h \quad (8)$$

2.3 VÄRMETRANSPORT I ETT GRUNDVATTENMAGASIN

I ett grundvattenmagasin med fullständigt vattenmättat grundvattenflöde sker värmetransporten genom värmeledning och konvektion (Allmänna ingenjörbyrå, 1978). Konvektion är värme som transporteras med hjälp av grundvattnets flöde och värmeledning beror av temperaturskillnader och mineralkornens och vattnets värmeledningsförmåga (Domenico & Schwartz, 1998). Hur mycket energi en kropp (t.ex. vatten eller mineralkorn) kan lagra betecknas med termen specifik värmekapacitet.

2.3.1 Värmeledning

Värmeledningen kan beskrivas med hjälp av Fouriers lag där värme flödar från en region med hög temperatur till en region med låg temperatur (ekvation 9) (Domenico & Schwartz, 1988).

$$H = -\kappa \nabla T \quad (9)$$

där H är värmeflödet [Wm^{-2}], κ är värmeledningsförmåga [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$] och T är temperaturen [°C].

När det gäller ett grundvattenmagasin som består både av vatten och mineralkorn behöver energitransporten ta hänsyn till både vattnets och mineralkornens värmeledningsförmåga. För denna effektiva energitransport kan Fouriers lag omskrivas (ekvation 10) (Domenico & Schwartz, 1988).

$$H_e = -\kappa_e \nabla T \quad (10)$$

där H_e är det effektiva energiflödet [Wm^{-2}] och κ_e är den effektiva värmeledningsförmågan [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$].

Både vattnet och mineralkornen är värmeledande och den effektiva värmeledningsförmågan beskrivs därför med hänsyn till volymandelen av vatten och mineralkorn (ekvation 11) (Domenico & Schwartz, 1988).

$$\kappa_e = \theta \kappa_f + (1 - \theta) \kappa_s \quad (11)$$

där θ är porositeten [-], κ_f är vattnets värmeledningsförmåga [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$] och κ_s är mineralkornens värmeledningsförmåga [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$].

Vatten har lägre värmeledningsförmåga än de flesta mineralkorn (Domenico and Schwartz, 1988). Ett system med låg porositet och därmed låg vattenhalt leder värme bäst och ett system med hög porositet är bättre i värmelagringssynpunkt (Sundberg, 1981).

2.3.2 Konvektiv värmetransport

Konvektiv värmetransport sker när tempererat vatten strömmar genom ett magasin av poröst material och värme överförs till mineralkornen som magasinet är uppbyggt av. Genom denna värmeväxling kyles vattnet succesivt men fortsätter att strömma med en oförändrad hastighet (Allmänna ingenjörbyrå, 1978).

Konvektiv värmetransport kan vara naturlig eller påtvingad (Sundberg, 1991). Naturlig konvektion orsakas av vattnets densitetskillnader och påtvingad konvektion är vattenrörelser som orsakas av potentialskillnader, t.ex. vid pumpning. Den konvektiva värmetransporten har både advektiva och dispersiva komponenter. Advektion är värmetransport direkt kopplat till det linjära grundvattenflödet genom det porösa mediet och termisk dispersion är en stokastisk spridning av värmeenergi i tre dimensioner (Lee, 2013).

3. MODELLTEORI

En modell är en förenklad bild av en ofta mer komplex verklighet och resultat bör därför tolkas med stor försiktighet. I inledandet av en grundvattenundersökning är det lämpligt att upprätta en konceptuell modell för ökad förståelse av de lokala hydrogeologiska förhållandena. Denna är en generaliserad beskrivning av hur ett grundvattensystem eller en akvifer fungerar med avseende på bl.a. storlek, gränser och den naturliga grundvattenströmningen. Baserat på den konceptuella modellen kan sedan en matematisk modell byggas upp, där ytterligare förenklingar kan vara nödvändiga (Knutsson & Morfeldt, 1995).

En matematisk modell simulerar grundvattenflöde genom att lösa grundläggande ekvationer tillsammans med ansatta randvillkor. För tidsberoende problem är det även nödvändigt att använda initialvillkor. Matematiska modeller kan antingen lösas analytiskt eller numeriskt. Analytiska lösningar är möjliga om problemet är relativt enkelt, medan numeriska lösningar används för att lösa mer komplexa problem (Anderson & Woessner, 2002).

För att få modellen att överensstämma med verkligheten bör modellen kalibreras mot uppmätta grundvattennivåer. Detta kan göras genom *trial-and-error* eller med ett automatiserat parameteruppskattningsprogram. Med *trial-and-error* ändras parametrarna manuellt i modellen tills utdata visar tillräckligt stor överensstämmelse med uppmätt fältdata. Om ytterligare fältdata finns kan dessa data användas för att validera modellen. Modellen kan sedan användas för prediktion av olika scenarier. En känslighetsanalys över inparametrarna kan därefter genomföras för att studera hur förändringar av olika inparametrar påverkar modelleringsresultatet (Anderson & Woessner, 2002).

3.1 NUMERISK MODELL - MODFLOW

I användandet av MODFLOW byggs grundvattenflödessystemet upp av ett rutnät av celler. Den grundläggande ekvationen för grundvattenströmning är baserad på Darcys lag i tre dimensioner kombinerat med massans bevarande (ekvation 12). Ekvationen löses med finita differensmetoden där den hydrauliska potentialen räknas ut för varje cell (Harbaugh, 2005). Vid stationära förhållanden är högerledet = 0. Enheterna uttrycks här generellt med dimensionerna: L = längd, M = massa, T = tid.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (12)$$

där K_x , K_y , K_z är den hydrauliska konduktiviteten i x-, y, och z-led [LT^{-1}], $\frac{\partial h}{\partial x}$, $\frac{\partial h}{\partial y}$, $\frac{\partial h}{\partial z}$ är den hydrauliska potentialens gradient i x-, y- och z-led [-], W är det volymetriska flödet per volymenhet som representerar sänkor eller källor av vatten i grundvattensystemet [T^{-1}], S_s är den specifika magasinskoefficienten för det porösa materialet [L^{-1}] och t är tid [T].

Specifik magasinskoefficient är den volym vatten som lagras eller avges per volymenhet när grundvattnets trycknivå ändras en enhet i grundvattenmagasinet (Carlson & Gustafsson, 1984). Magasinskoefficienten [-] är den vattenvolym som avges eller lagras per areaenhet då grundvattnets trycknivå ändras en enhet. För en öppen akvifer är vattenavgivningstalet lika med magasinskoefficienten och beräkningen modifieras för att ta hänsyn till dränering.

Magasinskoefficienten och den hydrauliska konduktiviteten kan väljas att variera i modelldomänen. Sänkor och källor är randvillkor som utgör inflöde samt utflöde till modellen och de kan väljas att variera i tiden.

Flödesekvationen används tillsammans med randvillkor med specificerade startvärden på grundvattnets totalpotential för att kunna generera en lösning. Randvillkoren kan antingen vara fysiska eller hydrauliska (Anderson & Woessner, 2002). Fysiska randvillkor representeras av fysikaliska gränser till grundvattensystemet, t.ex. grundvattendelare och vattenytor. Hydrauliska randvillkor representeras av strömningslinjer. Det finns tre typer av randvillkor som används vid numerisk modellering (Anderson & Woessner, 2002):

1. Specificerad hydraulisk potential (Dirichlet) – Bestämd totalpotential vid randen som är oberoende av flödesmönstret i den övriga modelldomänen.
2. Specificerat flöde (Neumann) – Bestämd potentialgradient vid randen. Kan användas för att beskriva en rand över vilken inget flöde ska ske.
3. Potentialbetingat flöde (Cauchy) - Bestämd totalpotential och potentialgradient vid randen. Kan användas för att simulera ett vattendrag med ett semipermeabelt bottensediment där flödet mellan modellcellerna och randvillkoret beräknas utifrån skillnaden i hydraulisk höjd och ett värde på en konduktansterm som motsvarar motståndet för vattnet att flöda.

För att kontrollera att grundvattenflödet modelleras korrekt i MODFLOW beräknas en vattenbalans på inflöde och utflöde (Harbaugh, 2005). Skillnaden i procent (D) mellan inflöde och utflöde (ekvation 13) bör vara så liten som möjligt, där max en procent kan antas acceptabelt (Anderson & Woessner, 2002).

$$D = \frac{100(\text{inflöde} - \text{utflöde})}{(\text{inflöde} + \text{utflöde})/2} \quad (13)$$

3.2 VÄRMETRANSPORT MED MT3DMS

MT3DMS är en modul som hanterar ämnestransport och kan användas tillsammans med MODFLOW med antagandet att ämnestransporten inte påverkar flödesfältet signifikant (Zheng, 2010). För värmetransport innebär det att temperaturens inverkan på fluidens densitet och viskositet anses försumbar. Flöde och värmetransport är således okopplade och möjliggör ökad beräkningseffektivitet. Om temperaturen bedöms påverka fluidens densitet och viskositet är SEAWAT-modulen, som kopplar flöde och värmetransport, att föredra. En temperaturskillnad inom 15 grader påverkar inte flödesfältet signifikant av fluidens temperaturberoende och MT3DMS kan användas istället för SEAWAT (Ma & Zheng, 2010).

Simulering av temperatur med MT3DMS baseras på de likheter som finns mellan ämnestransport och värmetransport. Den generella partiella differentialekvationen som MT3DMS använder för att lösa ämnestransport med linjär sorption beskrivs enligt ekvation 14 (Zheng & Wang, 1999):

$$\left(1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d\right) \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(\theta \mathbf{D}_m + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \nabla C \right] - \nabla \cdot (qC) + q_s C_s \quad (14)$$

där C är ämneskoncentrationen [ML^{-3}], θ är porositeten [-], ρ_b är skrymdensiten [ML^{-3}], K_d är ämnets fördelningskoefficient [L^3M^{-1}], $\mathbf{q}$ är den specifika flödesvektorn [LT^{-1}], $\mathbf{D}_m$ är molekylär diffusionskoefficient [L^2T^{-1}], α är dispersionsvektorn [L], $q_s C_s$ är källa eller sänka av ämneskoncentrationen [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$] och t är tid [T].

Värmetransport i en akvifer är framför allt styrd av konvektion via den fluida fasen, värmeledning och dispersion genom fluiden och akviferens beståndsdelar samt värmeutbytet mellan fluiden och akviferens beståndsdelar. Genom att anta termiskt jämviktsläge mellan fluiden och akviferens beståndsdelar, samt försumma eventuell ångfas i akviferen, kan värmetransporten beskrivas enligt ekvation 15 (Zheng, 2010):

$$\left(1 + \frac{1-\theta}{\theta} \frac{\rho_s c_s}{\rho c_F}\right) \frac{\partial(\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\theta \left(\frac{\kappa_e}{\theta \rho c_F} + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \cdot \nabla T \right] - \nabla \cdot (qT) - q'_s T_s \quad (15)$$

där T är temperaturen [$^{\circ}\text{C}$], c_s är specifika värmekapaciteten för soliden [$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$], c_F är specifika värmekapaciteten för fluiden [$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$], κ_e är den effektiva värmeledningsförmågan [$\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$], ρ_s är solidens densitet [kgm^{-3}], ρ är fluidens densitet [kgm^{-3}] och $q'_s T_s$ är källa eller sänka med temperaturen T [$^{\circ}\text{C T}^{-1}$].

Som synes finns likheter mellan ekvation 14 och ekvation 15. Den första termen i högerledet i ekvation 15 representerar värmetransport via värmeledning och dispersion, vilket är analogt med termen för molekylär diffusion och mekanisk dispersion för ämnestransport i ekvation 14. Den andra termen i ekvation 15 representerar värmetransport via konvektion, vilket är analogt med advektionstermen i ämnestransportekvationen. Den tredje termen representerar tillkomst eller bortförande av värme vilket är analogt med källa/sänk-termen för ämnestransport.

Baserat på dessa likheter mellan ämnestransport och värmetransport kan parametrarna som implementeras i MT3DMS vid ämnestransport uttryckas för att simulera värmetransport. Följande parametrar för värmetransport införs: skrymdensitet, ρ_b , (ekvation 16), termisk fördelningsfaktor, K_{d_temp} , (ekvation 17) och termisk molekylär diffusionskoefficient, D_{m_temp} , (ekvation 18):

$$\rho_b = (1 - \theta)\rho_s \quad (16)$$

$$K_{d_temp} = \frac{c_s}{\rho c_F} \quad (17)$$

$$D_{m_temp} = \frac{\kappa_e}{\theta \rho c_F} \quad (18)$$

Ekvation 15 kan därmed skrivas om till ekvation 19:

$$\left(1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_{d_temp}\right) \frac{\partial(\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(\theta \mathbf{D}_{m_temp} + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \nabla T \right] - \nabla \cdot (qT) + q_s T_s \quad (19)$$

För att lösa ämnestransportekvationen med MT3DMS behöver initial- och/eller randvillkor specificeras. För lösning av värmetransport måste temperaturer anges. Temperaturer anges då i °C och ersätter ämneskoncentrationen som anges i mg/L.

Temperaturer kan specificeras med punktkällor (point sources) vid flödesrandvillkoren med en specificerad temperatur för valt tidsintervall. Det går även att tilldela grundvattenbildningen från nederbörden en temperatur (recharge concentration).

Vid val av porositet, kan den effektiva (kinematiska) eller totala porositeten användas. I detta fall har den totala porositeten använts för beräkning av parametrarna som implementeras i MT3DMS och för själva värmetransporten har den effektiva porositeten använts, vilket är att föredra när advektion (konvektion) är det dominerande transportsättet.

4. MATERIAL OCH METODER

Programvaran Visual MODFLOW, utvecklad av Schlumberger Water Services, har använts för samtliga simuleringar med MODFLOW-2005 och MT3MS v5.2 som flöde- och värmetransportmotorer. ArcGIS har använts för bearbetning av indata och redovisning av utdata. Jordartskarta och grundvattenkarta från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) med upplösningen 1:50 000 har hämtats hem och georefererats. Egna kartor har skapats utifrån dessa.

Höjderna är angivna i RH00 och kordinatsystemet som använts är SWEREF99 TM.

4.1 OMRÅDESBESKRIVNING

Grundvattenmagasinet intill Löwenströmska sjukhuset är en del av Stockholmsåsen och sträcker sig från en bergvattendelare norr om Roterbro i söder till strax norr om udden av sjön Fysingens västra strand. Undersökningsområdet i detta examensarbete omfattar åsens utsträckning öster om Löwenströmska sjukhuset längs den del åsen går väster om Fysingens sydspets.

Grundvattenmagasinet består av isälvsmaterial som i det aktuella området ligger under den högsta kustlinjen (HK), vilket innebär att åsen har bildats subakvatiskt (Gustafsson, 1978). En subakvatisk ås är ofta uppbyggd med en kärna av grovt material, grus, sten och block. Mot dess kanter är konstorlekssammansättningen vanligtvis finare och en skiktning med grövre och finare skikt förekommer ofta. Då de är avsatta under HK överlagras åsmaterialet ställvis av finkorniga glaciala och postglaciala sediment vilket kan ge helt eller delvis slutna förhållanden. Under åsmaterialet återfinns ofta morän, som avsattes när isen drog sig tillbaka. Då åsarna består av grovt material och följer lågpunkterna i landskapet innehåller de grundvatten och bildar akviferer med hög potential för uttag (Gustafsson, 1978).

Typmiljövärden för en subakvatisk ås redovisas i tabell 1, vilka har använts som underlag och jämförelser till modellen.

Tabell 1. Typvärden för en subakvatisk ås

Parameter	Mest sannolika värde	Intervall	Referens
K_z [ms^{-1}]	10^{-4}	$10^{-6} - 10^{-2}$	(Blomqvist & Tistad, 1998)
K_x [ms^{-1}]	10^{-3}	$10^{-5} - 10^{-1}$	(Blomqvist & Tistad, 1998)
Effektiv porositet [-]	0,25	0,15 - 0,35	(Blomqvist & Tistad, 1998)
Transmissivitet [m^2s^{-1}]		0,1 - 0,6	(Gustafsson, 1978)
Vattenavgivningstal [-]		0,1 - 0,2	(Gustafsson, 1978)

Löwenströmska har enligt vattendom (VA 15/82) rätt till uttag av motsvarande 40 l/s ur Stockholmsåsen för energiändamål. Längre söderut i magasinet ligger Hammarby vattentäkt som har tillåtelse att ta ut 301 l/s per dygn (korvarigt) och 39 l/s per månad samt en källa med ett utflöde av 10 - 15 l/s, kallad Hammarby källa (Eriksson, 2009).

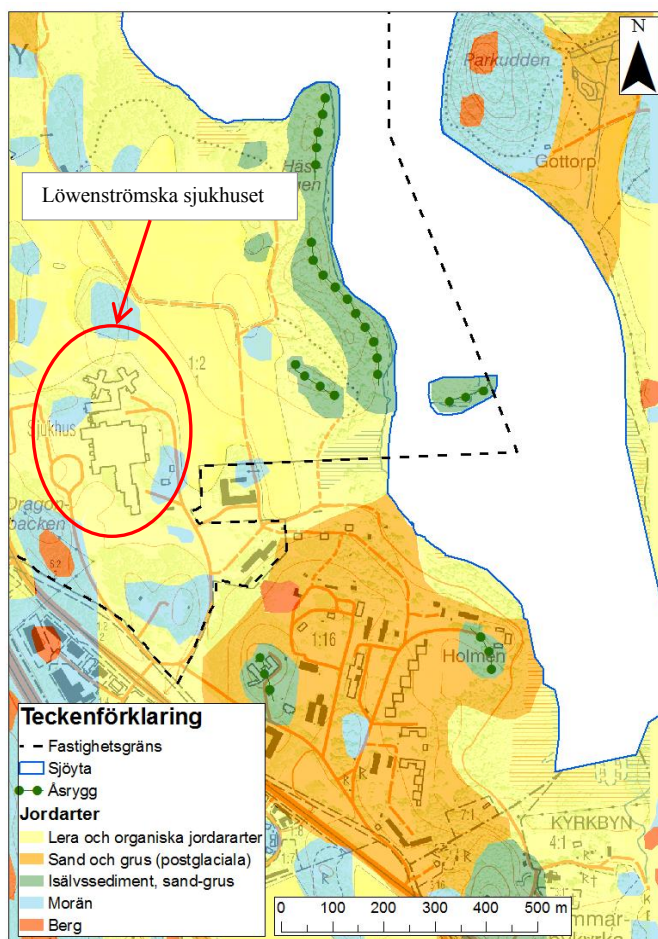
4.2 KONCEPTUELL MODELL

För att översiktligt förstå grundvattensystemet har en konceptuell modell med avseende på geologiska, hydrologiska och hydrogeologiska förhållanden tagits fram. Datainsamling

kommer framförallt från VIAK:s rapport "Grundvattenvärme vid Löwenströmska sjukhuset" (VIAK, 1981) och opublicerat material som rapporten grundats på. Material från VIAK omfattar bl.a. jordlagerföljdsdata och grundvattennivåer före och efter den provpumpning som genomfördes år 1981. Jordartsgeologisk karta, berggrundsgeologisk karta och grundvattenkarta från SGU har även använts. Den konceptuella modellen utgör grunden för den numeriska modellen.

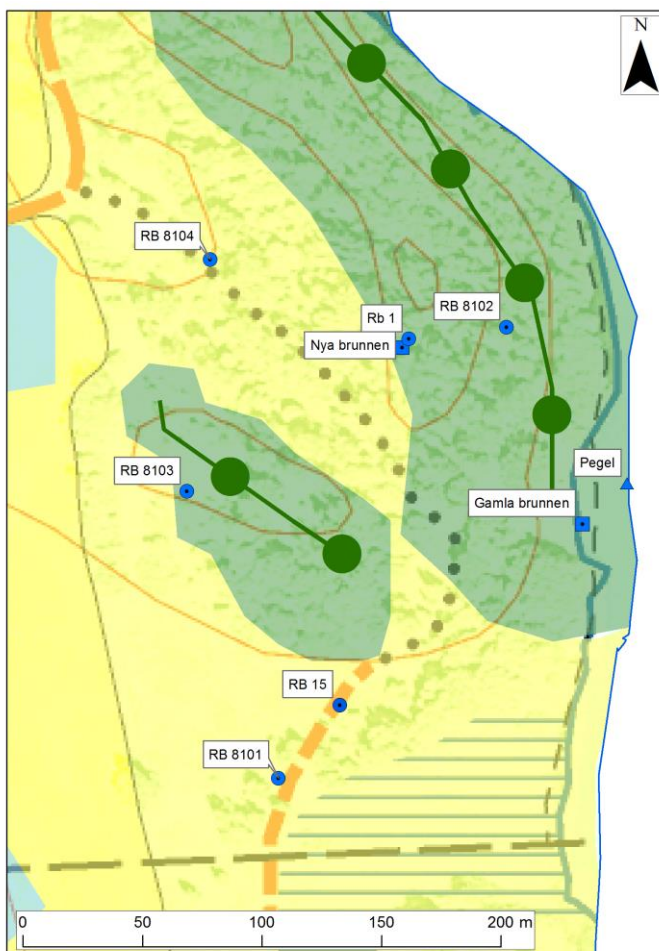
4.2.1 Geologiska förhållanden inom modellområdet

I det aktuella området intill Löwenströmska har ett randläge bildats (åsen går i dagen) på en sträcka av ca 600 m. Randbildningen består av sand- och grusavlagringar. I väster är randbildningen lägre och omgärdas och överlagras av glaciala och postglaciala finsediment, främst lera (figur 2). I öster stupar åsen brant ner i sjön Fysingen, vars bottensediment sannolikt består av finkornigt material som överlagrar isälvs materialet (VIAK, 1981). Ön Kalvholmen som syns i figur 2 tros även ingå i denna randbildning.



Figur 2. Jordartskartsbild över Stockholmsåsen vid Löwenströmska sjukhus fastighetsområde baserad på SGUs jordartskarta (SGU, 2013a). Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).

Berggrunden består i huvudsakligen av gnejsiga bergarter (granit, granodiorit m.m.) (SGU, 2013b). Data avseende djup till berg är begränsad. I de undersökningar VIAK gjort har berg/block-nivån påträffats vid tre stycken rörborrningar: RB 8101, RB 8103 och en rörborrning nära pegeln i Fysingen (figur 3).



Figur 3. Rörorboringar (RB xx), pegel, Nya och Gamla brunnens positioner Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).

En rörorboring, RB 8102, har drivits djupt ned för att sedan avslutats, men dock inte drivits ned till berg/block (tabell 2). Om rörorboringarna antas representera bergnivån lutar bergnivån från väster till öster mot sjön Fysingen.

Tabell 2. Rörorboringar och till de nivåer i plushöjder de drivits ned till.

Rörorboring	Berg/block-nivå [RH00 m]	Brunnsdjup [RH00 m]
RB 8101	-13,54	
RB 8103	-13,91	
RB nära pegel i Fysingen	-25,00	
RB 8102		-22.75

Jordlagerföljdsdata från RB 8101 och rörorboring nära pegel i Fysingen påvisar en mäktighet av morän om 1- 2 m under åsmaterialet.

4.2.2 Geohydrauliska förhållanden inom modellområdet

Grundvattenmagasinet sträcker sig under finsedimenten utanför de partier av åsen som går i dagen. Grundvattenströmningen sker från söder och vid opåverkad strömning finns en ONO-riktning mot sjön Fysingen. Strandlinjen är således en utflödeszon för grundvatten. Vid Nya brunnen och söder om den är grundvattenmagasinets hydrauliska gradient ca 0,4 promille.

Gradienten ökar vid strandzonen till ca 4 promille. Från provpumpningen kunde inte grundvattenmagasinets hydrauliska gränser bestämmas, då avflödet till Fysingen varit större än uttaget (VIAK, 1981).

Grundvattenmagasinets hydrauliska egenskaper är goda. Transmissiviteten beräknas vara ca 0,2 m²/s och magasinskoefficienten bedöms vara ca 0,2 (VIAK, 1981). Den hydrauliska konduktiviteten kan beräknas genom att dividera transmissiviteten med den vattenförande mäktigheten (Knutsson & Morfeldt, 1993). Värden på den hydrauliska konduktiviteten har beräknats utifrån rörborrningarna RB8102 och RB8103 (tabell 3).

Tabell 3. Vattenförande mäktighet för RB 8101 och RB 8103 och beräknad hydraulisk konduktivitet.

	Vattenförande mäktighet [m]	Beräknad hydraulisk konduktivitet [ms⁻¹]
RB 8102	24,00	0,0083
RB 8103	14,50	0,014
Medel	19,25	0,011

Utgående från resultaten av provpumpningen bedömde VIAK att grundvattenmagasinets nivåförändringar i huvudsakligen beror på den reglerande funktion som sjön Fysingen har på magasinet. Fluktuationerna i grundvattnets nivåer korrelerar väl med sjöns vattenståndsförändringar.

Grundvattenbildningen sker främst via nederbördsinfiltration direkt på åsytan. Viss grundvattentillrinning kan antas ske i berg- och moränområden runt om magasinet samt från det sandtäckta lager som omgärdar magasinet.

4.3 NUMERISK GRUNDVATTENMODELLERING

En numerisk grundvattenmodell över grundvattenströmningen byggdes upp baserad på en förenkling av den konceptuella modellen. Denna så kallade hydrauliska modell kalibrerades och verifierades mot uppmätta grundvattennivåer. Den kalibrerade modellen användes sedan till simuleringar av ett fiktivt geoenergilag.

4.3.1 Antaganden och avgränsningar för den numeriska modellen

Modellområdet avgränsades att sträcka sig från Fysingens sydspets och vidare norrut där åsmaterialet fortsätter under sjön (figur 5). Antagandet gjordes att utflödet sker där åsmaterialet bildar strand med sjön enligt jordartskartan från SGU.

Den hydrauliska konduktiviteten är förmodligen inte konstant i hela grundvattenmagasinet, men för simuleringen har en konstant hydraulisk konduktivitet ansatts för hela åsmaterialet. Att åsmaterialet kan ha en åskärna med grövre material och högre konduktivitet har därmed inte tagits hänsyn till.

I brist på geologisk information om hur ön Kalvholmen är sammankopplad med grundvattenmagasinet togs inte Kalvholmen med i den numeriska modellen.

Enligt jordartskartan är åsmaterialet delvis täckt av lera och sand. Ler- eller sandlagren anses ha en liten mäktighet som inte är av större betydelse. I den numeriska modellen har därför åsens översta lager endast tilldelats åsmaterial. På sidorna överlagras åsen av lera och sand.

Någon topografi av åsen eller intilliggande lager har inte tagits hänsyn till. Topografin antas inte ha större betydelse på grundvattennivåerna då åsmaterial har relativ hög genomsläpplighet och modellen enbart simulerar den vattenmättade zonen.

Grundvattenbildning antas ske där ås går i dagen och vid sandtäcket. Inom jordartsklassen ”Grov jord”, som åsen tillhör, är grundvattenbildningen i området 225-300 mm/år beräknat utifrån klimatdata för perioden 1963-2003 (Rodhe m.fl., 2006). Grundvattentillrinning från omgärdande jordarter har inte tagits hänsyn till.

4.3.2 Randvillkor

I den södra delen av modellen har ett randvillkor som motsvaras av en konstant hydraulisk potential (Constant head boundary) ansatts (figur 6). Det södra randvillkoret har ansatts till en potential på +1,84 m baserat på den hydrauliska gradienten om 0,4 promille som grundvattenmagasinet antas ha i längdriktningen från Nya brunnen och söderut. Beräknat från RB 15:s grundvattennivå på +1,6 m innan VIAK:s provpumpning, ger det en grundvattennivå på +1,84 m i modellens södra rand. Randvillkoret utgör inflöde till modellen och är konstant i tiden.

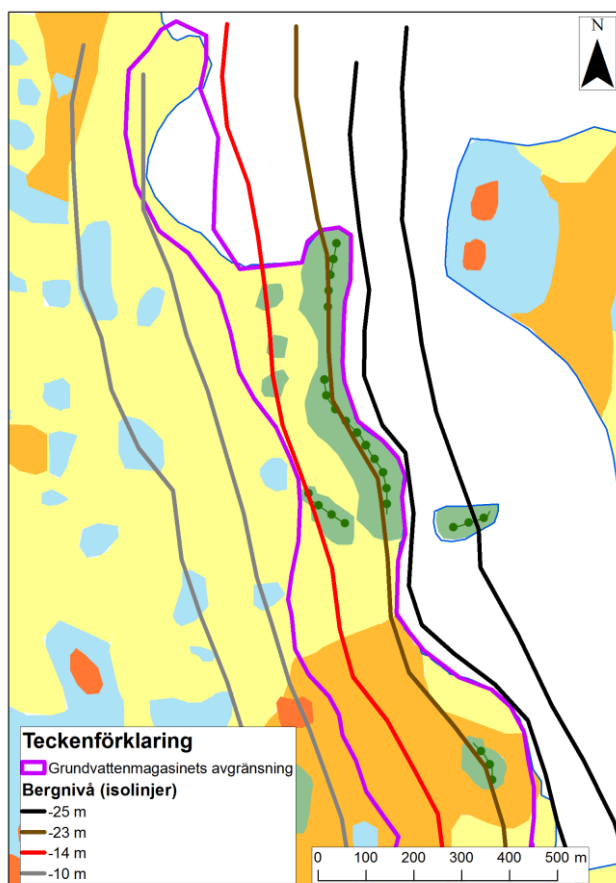
Sjön Fysingen har tilldelats inaktiva celler i det översta lagret (som sträcker sig ned till nivån 0 m). Där åsmaterialet bildar strand med sjön enligt jordartskartan har ett potentialbetingat flöde med randvillkoret för vattendrag (River) ansatts. Randvillkoret för vattendrag har lagts under de inaktiva cellerna och har kontakt med åsmaterialet (figur 6). Vattendragsvillkoret kan fungera som en källa eller sänka av vatten från modellen baserat på skillnad i ytvattennivå och grundvattennivå. Ytvattennivån har ansatts till +1,47 m utifrån den nivå sjön hade precis innan provpumpningen startades. I vattendragsvillkoret ska ett värde på konduktans ansättas, vilket motsvarar ett motstånd för vattnet att flöda mellan åsen och sjön, samt en nivå för bottensediment där utläckage eller eventuellt inläckage sker. Värdet på konduktansen har kalibrerats fram och bottensedimentet valdes att läggas från nivån 0 m till -3,5 m. Utan pumpning i grundvattenmagasinet sker endast utflöde av grundvatten då den konstanta hydrauliska potentialen i söder har ett högre värde än ytvattennivån i vattendragsvillkoret.

Grundvattenbildningen har ansatts med randvillkoret för grundvattenbildning (Recharge). Recharge tilldelar grundvattenbildning i mm/år på en vald yta. Grundvattenbildningen har ansatts i det översta lagret där åsmaterial och sand syns från jordartskartan med värdet 240 mm/år. Ingen hänsyn har tagits till grundvattenbildning från omgivande jordlager.

4.3.3 Uppbyggnad av hydraulisk numerisk modell

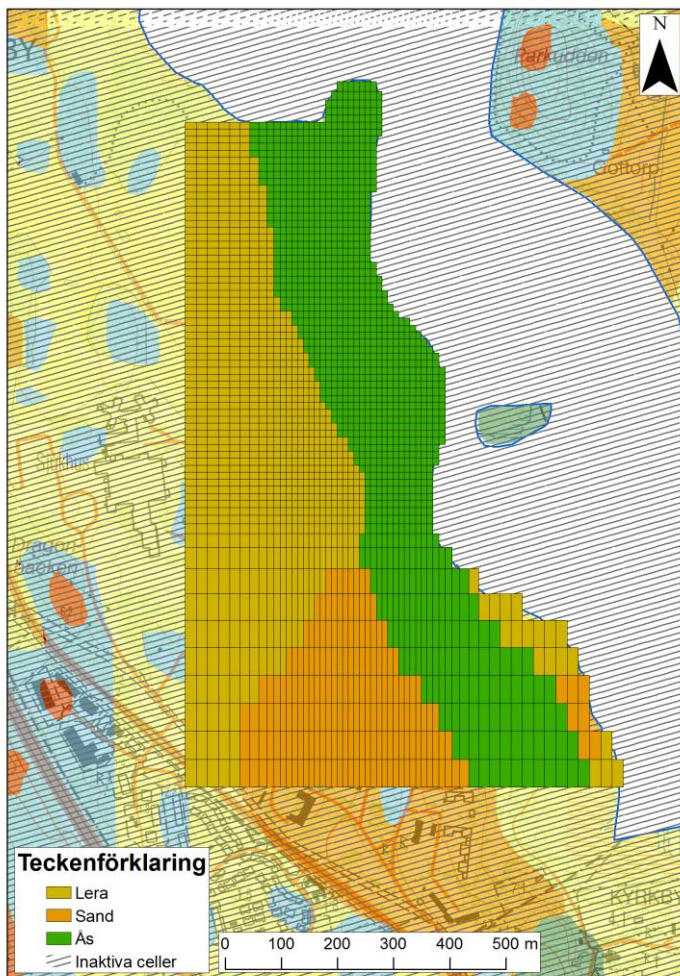
Det första som gjordes var att bygga upp bergnivån i den numeriska modellen. Antagandet gjordes att bergnivån sjunker från väster till sjön Fysingen. Detta är grundat på de rörborrningar, RB8101 och RB8103, som är neddrivna väster om åsen och den rörborrning, RB8102, som är neddriven mellan dessa samt rörborrningen i sjön Fysingen. Isolinjer av bergnivån ritades i ArcGIS grundat på dessa fyra bergsnivåer och att de på ett ungefär skulle följa grundvattenmagasinets utbredning enligt SGUs grundvattenkarta (figur 4) (SGU, 2013b). Isolinjerna omvandlades till punkter med verktyget ETGeowizard, importerades till Visual MODFLOW och en bergsyta interpolerades fram med interpolationsmetoden Kriging. Vid interpolationen av en bergsyta i Visual Modflow fås ett deformerat grid där modellens

övre lager följer den interpolerade bergytan. Vid simulering av transporter är ett uniformt rutnät att föredra (Schlumberger Water Service, i.d.). Två uppsättningar av modellen med samma gridupplösning skapades därför och utifrån det deformerade rutnätet ritades ett uniformt rutnät upp där modellen inte tvingas följa bergytan. Med ”ritas upp” menas här att celler tilldelas en hydraulisk konduktivitet för det material (berg eller jordart) de ska representera. Berget tilldelas således en hydraulisk konduktivitet i modellen med uniformt rutnät utifrån den interpolerade bergytan i modellen med deformerat rutnät.



Figur 4. Isolinjer över antagen bergnivå anpassad till rörborringar och grundvattenmagasinets avgränsning enligt SGU (SGU, 2013c). Bergnivåer är i RH00.

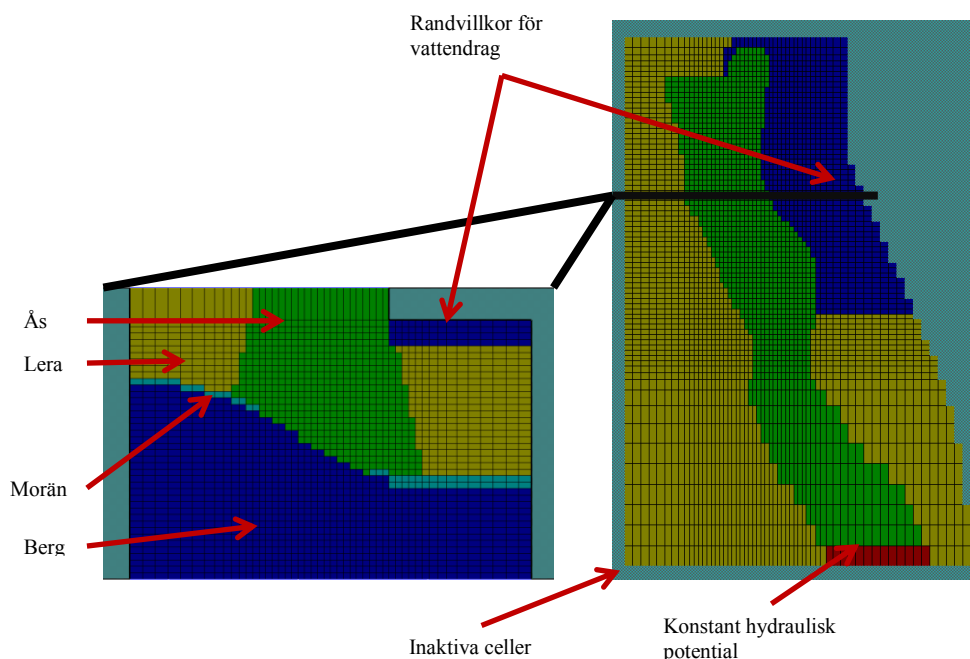
Efter uppritande av bergnivå byggdes den numeriska modellen upp att bestå av totalt fyra olika jordarter: åsmaterial, lera, sand och morän. Först ritades åsmaterialet in i det översta lagret utifrån en antagen utbredning av åsmaterialet med fri grundvattenyta baserad på jordarts- och grundvattenkarta (figur 5). Någon topografi har inte ritats in, utan det översta lagret är kapat vid nivån 5 m. Detta är en nivå strax över grundvattenmagasinets uppmätta trycknivåer. Utifrån det översta lagret ritades åsen ner till berg med en rasvinkel om ca 27 grader. Detta är grundat på att mättad sand har en rasvinkel om 25 grader och grus har en rasvinkel om 25 - 30 grader (Cobb, 2009). Jordlagerföljdsdata från RB 8101 påvisar först åsmaterial (grus/sand) på en nivå av -3,74 m och åsmaterialets utbredning har därför anpassats till denna. Övrig tillgänglig jordlagerföljdsdatum finns för RB 8102, RB8103 och RB 8104 där ett lertäcke om max 2 m täcker grövre vattenförande material. Ingen hänsyn har tagits till denna lera i modellen utan åsmaterial täcker samtliga av dessa rörborringar.



Figur 5. Modellens utbredning i det översta lagret. Bakgrundskartan är jordartskartan för att visa hur åsmaterialets utbredning har extrapolerats från isälvsmaterialet i söder. Modellområdet avgränsas av de inaktiva cellerna. Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).

Varje lager i modellen är 1 m, förutom det översta lagret som är 4 m (från +1 m till +5 m). Kolumnernas bredd varierar mellan 20 m och 10 m i modellen, med högre upplösning i modellens centrala delar (figur 6).

Morän lades under åsmaterialets västra sida med en meters mäktighet, baserat på jordlagerföljden från RB 8101. På åsmaterialets östra sida lades 1 - 2 m morän, baserat på rörborrningen nära pegeln i Fysingen. Lera lades att täcka sidorna och omgärda åsmaterialet (figur 6). Sand valdes att täcka åsmagasinet i delar av den södra delen av åsmagasinet utifrån jordartskartan. Ingen hänsyn togs till de små områdena med morän och inte heller till den del av isälvsmaterial och berg som ligger utanför SGUs kartläggning av grundvattenmagasinet.



Figur 6. Till höger syns en profil av modellen och till vänster modellens utbredning på nivån -3,5 m (lager 5). De olika jordarterna och berg är utmärkta, samt randvillkoren. Sand syns inte i modellen, då sand endast är tilldelat i det översta lagret längre söderut. Profilens höjdförhållande är överdrivet 10 gånger.

Jordarterna och berg tilldelades hydraulisk konduktivitet, specifik magasinskoefficient, vattenavgivningstal samt effektiv och total porositet (tabell 4). För lera, sand, morän och berg har dessa ansatts efter litteraturvärden (se bilaga). Vattenavgivningstalet har ansatts till samma värde som den effektiva porositeten. Åsmaterialet har tilldelats vattenavgivningstal efter den magasinskoefficient som uppmätts vid provpumpning, vilken även antagits vara den effektiva porositeten. Den totala porositeten för åsmaterialet har ansatts till 0,25 baserat på porositeten för grus. För grus varierar totala porositeten mellan 0,25 - 0,4 (Fletcher, 1978). Den hydrauliska konduktiviteten för åsmaterialet har ansatts med det beräknade medelvärde 0,011 m/s (tabell 4).

Tabell 4. Hydraulisk konduktivitet, specifik magasinskoefficient (S_s), vattenavgivningstal (S_y) samt porositeter för jordarter och berg som använts i modelleringen

Jordart eller berg	Hydraulisk konduktivitet x- och y-led [ms^{-1}]	Hydraulisk konduktivitet z-led [ms^{-1}]	S_s [m^{-1}]	S_y [-]	Effektiv porositet [-]	Total porositet [-]
Lera	10^{-9}	10^{-10}	10^{-3}	0,1	0,1	0,45
Morän	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-4}	0,08	0,08	0,2
Berg	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	0,005	0,005	0,005
Sand	10^{-4}	10^{-5}	10^{-3}	0,2	0,2	0,25
Åsmaterial	0,011	0,0011	10^{-4}	0,2	0,2	0,25

4.3.4 Kalibrering och verifiering av den numeriska modellen

Grundvattennivåer mättes av VIAK innan och under den provpumpning som genomfördes 1981-04-29 till 1981-07-24 med syfte att klarlägga förutsättningarna för ett grundvattenuttag för energiändamål från grundvattenmagasinet. Provpumpningen utfördes med uttag från Nya brunnen med 22,3 l/s och mätningar av grundvattennivåer gjordes i följande observationsrör: RB 1, RB 15, RB 8108, RB 8102, RB 8103 och RB 8104. Mätningar utfördes även i den Gamla och Nya brunnen och vattenståndsmätningar gjordes vid en pegel i Fysingen (figur 3). RB 8101, RB 8102, RB 8103, RB 1 samt Nya brunnen har placerats utifrån deras koordinater. RB 8104, RB 15, Gamla brunnen och pegel har georefererats i ArcGIS utifrån en karta med deras positioner från VIAK.

En manuell kalibrering av modellen gjordes under stationära förhållanden genom att jämföra modellens beräknade grundvattennivåer med de grundvattennivåer som uppmätts innan provpumpningen påbörjades (tabell 5). Konduktansen hos bottensedimentet har ändrats vid kalibreringen för att få en sådan bra överensstämmelse som möjligt med de uppmätta grundvattennivåerna.

Verifiering av modellen gjordes genom att implementera provpumpningsbrunnen, Nya brunnen, i modellen med uttaget 22,3 l/s och ett filterrör om ca 6 m, med överkant -1 m och underkant -5,7 m utifrån en principskiss av brunnen. Grundvattennivåer i modellen jämfördes med uppmätta fältdata i slutet av provpumpningsperioden då stationära förhållanden hade uppnåtts (tabell 5). Som nämnts finns ett hydrauliskt samband mellan sjön och åsmaterialet, där åsens grundvattennivåer sammanfaller med sjön Fysingens. I slutet av provpumpningen låg sjöns vattenyta på +1,26 m. Ytvattennivån i randvillkoret för vattendrag ändrades även därför för att jämföra de beräknade och uppmätta grundvattennivåerna.

Tabell 5. Uppmätta grundvattennivåer innan provpumpning och vid stationärt tillstånd i slutet av provpumpning

Observationspunkt	Innan provpumpning [RH00 m]	Stationärt tillstånd i slutet av provpumpning [RH00 m]
RB 8101	+1,61	+1,36
RB 8102	+1,54	+1,31
RB 8103	+1,59	+1,34
RB 8104	+1,58	+1,33
RB 1	+1,54	+1,29
RB 15	+1,60	+1,37
Gamla Brunnen	+1,56	+1,34
Nya brunnen	+1,54	+0,71
Sjön Fysingen	+1,47	+1,26

4.4 MODELLERING AV FIKTIVT GEOENERGILAGER

Modellering av ett fiktivt geoenergilagrar har baserats på Löwenströmskas energi- och toppeffektbehov. Löwenströmskas värmebehov är ca 6500 MWh per år (normalårskorrigerat för de senaste åren) och kylbehov är ca 150 MWh per år (Karlsson, 2014). Som nämnts innan finns en tumregel som säger att genom att dimensionera värmepumpsystemet för 50 % av maximala värmeeffektbehovet erhålls 85 % av totala energin. Tillgänglig data över Löwenströmskas värmeeffektbehovet är begränsad, men för det första halvåret 2012 var toppvärmeeffekten 3270 KW (Karlsson, 2014). Genom att dimensionera geoenergilagrets maxuttag för denna toppeffekt bör 1226 KW utvinnas från grundvattnet med en antagen SP-faktor på 4. En SP-faktor på 4 är här ett antaget medelvärde, som kan anses rimligt för ett värmepumpsystem kopplat till ett akviferlager (Hägg, 2014). För att värmepumpsystemet ska stå för 85 % av den totala energin bör akviferlagret kunna leverera 4,14 GWh energi med motsvarande SP-faktor. Data över Löwenströmskas kyleffekt saknas (Karlsson, 2014). De simulerade upptagna temperaturerna är den grundvattentemperatur som i modelleringen antas gå direkt till utvinning av energi via värmeväxlare och värmepump. Eventuella förluster har inte beaktats.

Ett fiktivt geoenergilagrar modellerades för att vara i energibalans och lagra värme respektive kyla om 4,14 GWh. Detta gjordes via en iterativ process där flöden ändrades för en given brunnspacering. Den lägsta uttagna temperaturen på grundvattnet som simulerades från den varma brunnen från geoenergilagret i energibalans användes för att beräkna det maxflöde som behövdes för att täcka 50 % av toppeffekten via akvifer och värmepumpsystemet, d.v.s. 1226 KW. Från det maxflöde som behövdes undersöktes hur stort påverkansområdet blev till följd av pumpningen.

Utifrån det energibalanserade geoenergilagret som valdes att redovisas gjordes scenarier med olika pumplägen och flöden för att visa hur detta påverkar energilagringen.

4.4.1 Implementering med MT3DMS

De parametrar som behövs för värmetransport av MT3DMS har baserats på litteraturvärden för vatten och granit, då materialet i åsen antas vara av granitiskt ursprung. Samtliga parametrar redovisas i tabell 7 och är applicerade i hela modellen. Skrymdensiteten och termisk molekylär diffusionskoefficient är beräknade utifrån åsens antagna totala porositet.

Tabell 6. Parametrar som använts för värmetransport

Parameter	Symbol	Värde	Referens
Densitet, vatten [kgm^{-3}]	ρ_f	1000	Avrundat från Ingelstam m.fl. (1993)
Densitet, granit [kgm^{-3}]	ρ_s	2700	Ingelstam m.fl. (1993)
Total porositet [-]	θ	0,25	Antagen total porositet
Värmekapacitet, granit [$\text{Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$]	c_s	800	Ingelstam m.fl. (1993)
Värmekapacitet, vatten [$\text{Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$]	c_f	4180	Ingelstam m.fl. (1993)
Värmeledningsförmåga, granit [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$]	k_s	3,5	Ingelstam m.fl. (1993)
Värmeledningsförmåga, vatten [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$]	k_f	0,6	Ingelstam m.fl. (1993)
Värmeledningsförmåga, akvifer [$\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$]	k_b	2,775	Beräknad enligt ekvation 11
Skrymdensitet [kgm^{-3}]	ρ_b	2025	Beräknad enligt ekvation 16
Termisk fördelningsfaktor [Lmg^{-1}]	K_{d_temp}	$1,92 \cdot 10^{-7}$	Beräknad enligt ekvation 17
Termisk molekylär diffusionskoefficient [m^2h^{-1}]	D_{m_temp}	0,0096	Beräknad enligt ekvation 18
Longitudinell dispersivitet [m]	α_L	10	Standardvärde i Visual Modflow
Transversell horisontell dispersivitet [m]	α_{TH}	0,1	Standardvärde i Visual Modflow
Transversell vertikal dispersivitet [m]	α_{TV}	0,01	Standardvärde i Visual Modflow

Grundvattenmagasinets initiala temperatur har ansatts till 7,4°C, vilket var den temperatur som uppmättes av grundvattnet under VIAK:s provpumpning. Allt vatten som strömmar in naturligt i akviferen, grundvattenbildning från nederbörd och grundvattenströmning från det södra randvillkoret, antas även ha en temperatur om 7,4°C. Det södra randvillkoret har ansatts med en temperatur med randvillkoret punktkällor (point sources). Grundvattenbildningens temperatur har implementerats med randvillkoret för grundvattenbildningskoncentration (recharge concentration).

Då det finns en möjlighet att inducerad infiltration från sjön sker vid större uttag ur akviferen vilket riskerar påverka uttagstemperaturen från brunnarna har randvillkoret för vattendrag ansatts med en temperatur. Under sommarmånaderna har sjöns temperatur ansatts till 19 °C och under vintertid till 4 °C för att eventuellt påvisa om sjöns vattentemperatur påverkar brunnarna.

För att simulera den temperatur som pumpas ned i akviferen under vinter- respektive sommar drift har temperaturer lagts som punktkällor vid den varma och den kalla brunnens filter. Brunnarna har getts samma filternivå som Nya brunnen, från -1m till -5,7 m. De temperaturer som har simulerats att pumpas ned i modellen är 16°C under sommar driften och 4°C under vinter driften. Dessa temperaturer kan anses som rimliga medelvärden som kan användas för att uppskatta energipotentialen i åsen om konventionell teknik används (Hägg, 2014). För att kunna mäta temperaturer vid uttag och beräkna energibalans implementerades observationsbrunnar vid respektive brunns filter.

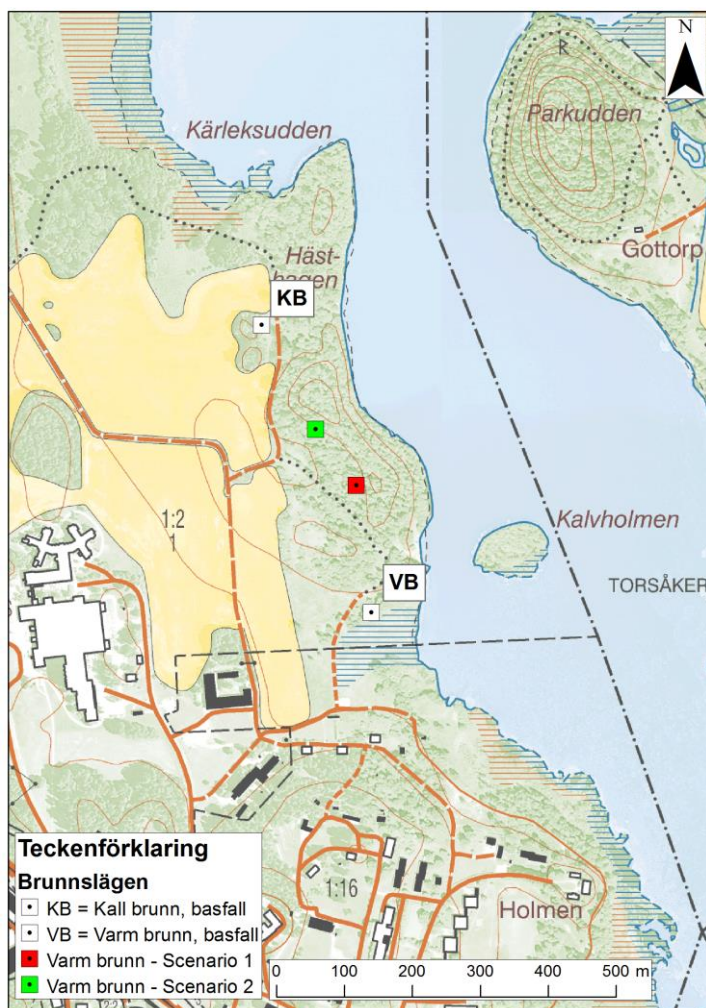
Sommar driften antogs pågå i tre månader och vinter driften i resterande nio månader av året. Simuleringarna valdes att köras i 5 år, då jämvikt bör ha uppnåtts om lagret befinner sig i energibalans (Hägg, 2014). Samtliga simuleringar startade med sommar drift och akviferens naturliga temperatur på 7,4 °C pumpas då upp ur den kalla brunnen. De temperaturpåverkade områdena eller temperaturfronten kring den varma och kalla brunnen förväntas vara som störst i slutet av sommar driften och i slutet av vinter driften.

Energibalansberäkning har skett för det femte året, för sommar driften under de tre första månaderna (35040 h - 37229 h) och för vinter driften de resterande nio månaderna (37230 h – 43800 h). Genom att beräkna temperaturskillnaden mellan upptaget och infiltrerat grundvatten för varje tidssteg (10 h) med använt flöde beräknades energin enligt ekvation 1 och 4 ovan.

4.4.2 Modellering av andra brunnslägen och flöden

För att se hur andra brunnslägen och andra flöden påverkar det fiktiva geoenergilagret i energibalans (betecknas här som basfall) valdes följande scenarier att testas och redovisas med modellerade temperaturobservationer:

- Scenario 1: Varm brunn flyttad närmare kall brunn (figur 7)
- Scenario 2: Varm brunn flyttad ännu närmare kall brunn (figur 7)
- Scenario 3: Platsbyte mellan kall och varm brunn i basfall
- Scenario 4: Somnardrift: uttag/infiltration = 50 l/s
- Scenario 5: Somnardrift: uttag/infiltration = 30 l/s
- Scenario 6: Vinterdrift – uttag/infiltration = 35 l/s
- Scenario 7: Vinterdrift – uttag/infiltration = 15 l/s



Figur 7. Den varma och kalla brunnens placering i basfallet och den varma brunnens placering i scenario 1 och 2. Den kalla brunnens placering är densamma i scenario 1 och 2 som i basfallet. I scenario 3 har ett platsbyte mellan den varma och den kalla brunnen gjorts. Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).

4.4.3 Känslighetsanalys

För att undersöka hur grundvattenflödet påverkar det fiktiva geoenergilagret gjordes en känslighetsanalys med avseende på åsmaterialets hydrauliska konduktivitet. En hydraulisk konduktivitet på 0,02 m/s samt 0,005 m/s valdes att studeras, vilket är ett högre och ett lägre värde än medelvärdet 0,011 m/s som använts.

En känslighetsanalys gjordes även på hur den effektiva och totala porositeten hos åsmaterialet påverkar det fiktiva geoenergilagret. Den effektiva porositeten har testats med värdena 0,15 samt 0,35. Detta är intervallet inom vilket den effektiva porositeten varierar hos en subakvatisk ås (Blomqvist & Tistad, 1998). Den totala porositeten har testats med värdena 0,2 och 0,4. I och med ändring av den totala porositeten har parametrarna som ingår i värmetransporten i MT3DMS ändrats (tabell 8).

Tabell 7. Ändring av inparametrar i MT3DMS vid ändring av den totala porositeten

Parameter	Symbol	Porositet = 0,2	Porositet = 0,4	Referens
Skrymdensitet [kgm^{-3}]	ρ_b	2160	1620	Beräknad enligt ekvation 16
Termisk molekylär diffusionsfaktor [m^2h^{-1}]	D_{m_temp}	0,013	0,005	Beräknad enligt ekvation 18

5. RESULTAT

5.1 KALIBRERING OCH VERIFIERING AV DEN NUMERISKA GRUNDVATTENMODELLEN

Konduktansen i river-villkoret kalibrerades till 3,6 m²/h. Beräknade och observerade grundvattennivåer innan provpumpning skiljer sig mest vid RB 8104 med 3 cm (tabell 9).

Tabell 8. Observerade och beräknade grundvattennivåer innan provpumpning. Nivåer i RH00.

ID	Observerad [RH00 m]	Beräknad [RH00 m]	Differens [m]
Gamla brunnen	+1,56	+1,57	0,01
Nya brunnen	+1,54	+1,56	0,02
RB 15	+1,60	+1,60	0,00
RB 8101	+1,61	+1,61	0,00
RB 8102	+1,54	+1,56	0,02
RB 8103	+1,59	+1,57	-0,02
RB 8104	+1,58	+1,55	-0,03
RB 1	+1,54	+1,56	0,02

Beräknade och observerade grundvattennivåer som uppnåtts efter stationärt tillstånd vid provpumpning skiljer sig som mest vid Nya brunnen med 0,50 m där provpumpningen skett (tabell 10), vilket kan bero på brunnslösluster. Övriga beräknade och observerade nivåer skiljer sig som mest vid RB 1 med ca 8 cm. Modellen efterliknar alltså inte den avsänkning som skett i pumpbrunnen vid provpumpningen, medan övriga beräknade värden anses godtagbara med den största skillnaden vid RB 1.

Tabell 9. Observerade och beräknade grundvattennivåer vid stationärt tillstånd i slutet av provpumpning

ID	Observerad [RH00 m]	Beräknad [RH00 m]	Differens [m]
Gamla brunnen	+1,34	+1,34	0,00
Nya brunnen	+0,71	+1,21	0,50
RB 15	+1,37	+1,39	0,02
RB 8101	+1,36	+1,40	0,04
RB 8102	+1,31	+1,31	0,00
RB 8103	+1,34	+1,33	-0,01
RB 8104	+1,33	+1,30	-0,03
RB 1	+1,29	+1,21	-0,08

5.2 FIKTIVT GEOENERGILAGER

5.2.1 Energibalanserat system

För den givna brunnspaceringen gick det att finna flöden som gav att det fiktiva geoenergilagret urladdas med 4,3 GWh under vinterdriften och återladdas med 4,27 GWh under sommardriften. Detta bedömdes ligga tillräckligt nära den önskade energilagringen på 4,14 GWh och energiobalansen på 0,03 GWh bedömdes godtagbar.

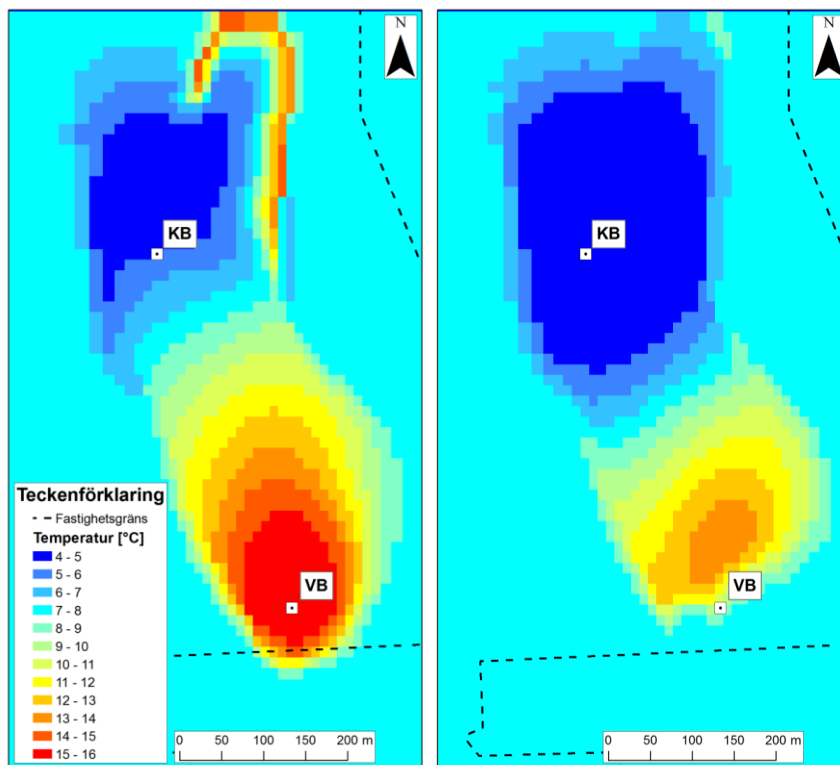
För att erhålla denna energibalans användes medelvattenflöden på 40 l/s under sommardriften och 25 l/s under vinterdriften. Pumpningsschemat visas i tabell 11 där 16 °C infiltrerats i den varma brunnen under sommardriften och 4°C infiltrerats i den kalla brunnen under vinterdriften. Sommardriften pågår i tre månader och vinterdriften i resterande nio månader.

Tabell 10. Pumpningsschema för det simulerade systemet med energibalans om ca 4,3 GWh.

	Flöde varm brunn [l/s]*	Flöde kall brunn [l/s]*
Sommar drift år 1	(+) 40	(-) 40
Vinter drift år 1	(-) 25	(+) 25
Sommar drift år 2	(+) 40	(-) 40
Vinter drift år 2	(-) 25	(+) 25
Sommar drift år 3	(+) 40	(-) 40
Vinter drift år 3	(-) 25	(+) 25
Sommar drift år 4	(+) 40	(-) 40
Vinter drift år 4	(-) 25	(+) 25
Sommar drift år 5	(+) 40	(-) 40
Vinter drift år 5	(-) 25	(+) 25

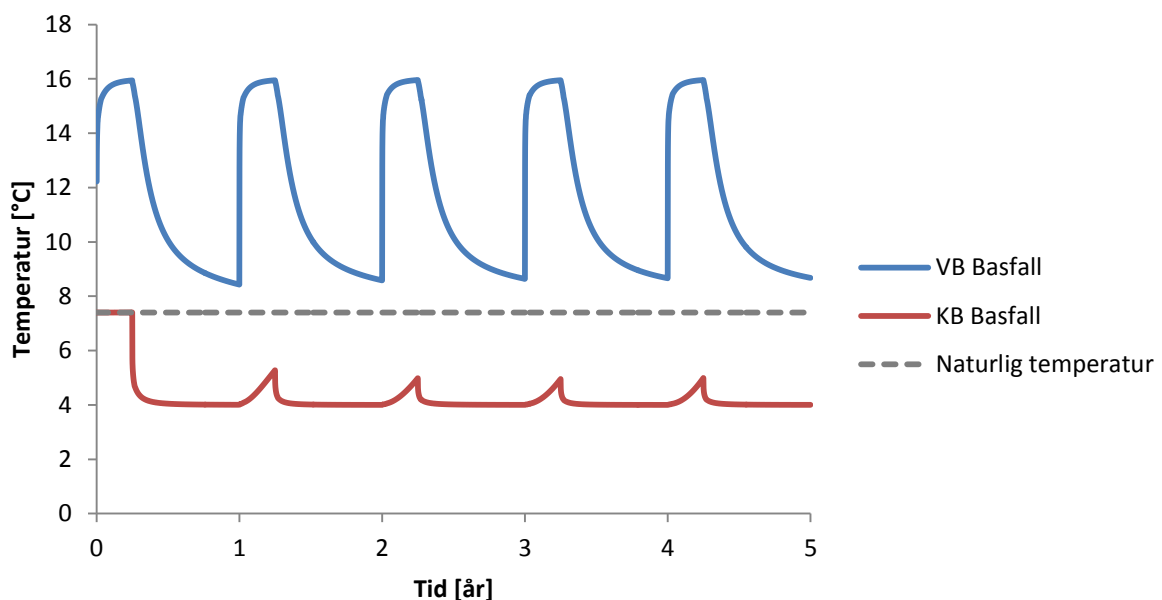
*Uttag representeras av (-) och infiltration representeras av (+)

Vid det sista tidssteget för sommardriften år 5 (37230 h), där uttag sker från den kalla brunnen och infiltration i den varma, kan den termiska fronten ses närma sig den kalla brunnen (figur 8). Inducerad infiltration från sjön påverkar inte den kalla brunnens temperatur. Vid det sista tidssteget är vinterdriften år 5 (43800 h), där uttag sker från den varma brunnen och infiltration i den kalla, kan den termiska fronten ses närmare den varma brunnen. All värme har inte lyckats tagits upp (figur 8). Inducerad infiltration från sjön i modellens norra del påverkar inte den varma brunnens temperatur.



Figur 8. Grundvattnets modellerade temperaturutbredning i slutet av sommar driften år 5 till vänster och slutet av vinterdriften år 5 till höger i bild för det energibalanserade systemet.

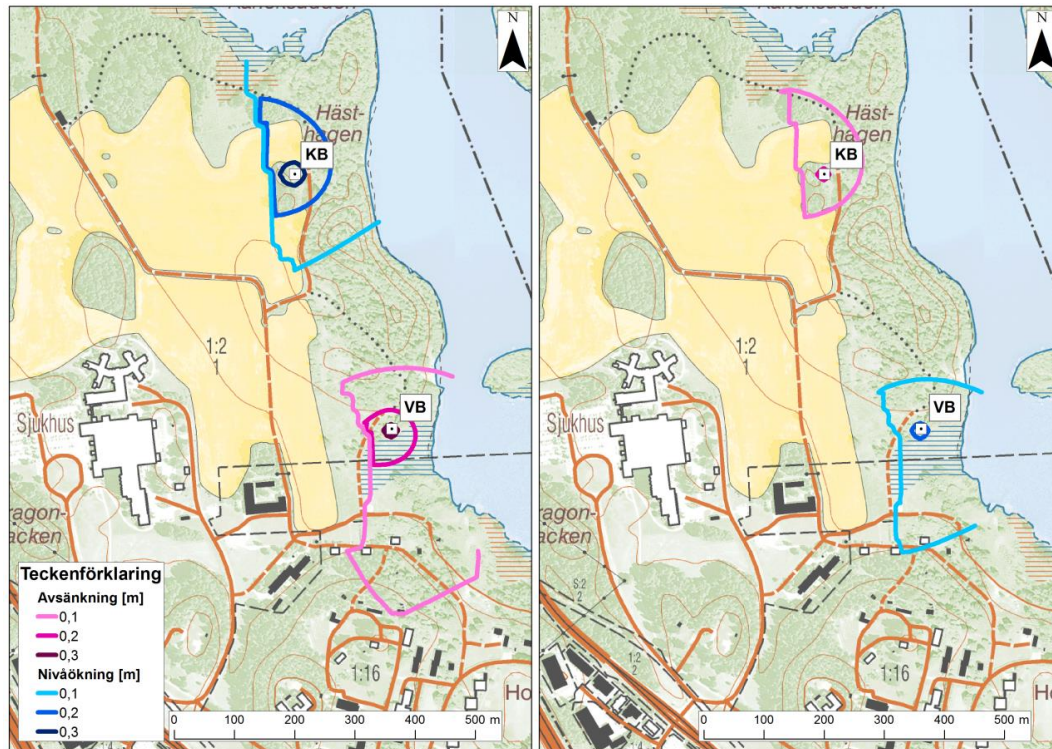
Från temperaturberäkningarna i den varma och den kalla brunnen kan ingen tydlig temperaturhöjning eller temperatursänkning ses efter år 2 (figur 9). Inget termiskt genomslag har uppstått då de uttagna temperaturerna är högre än den naturliga grundvattentemperaturen i den varma brunnen och lägre än den naturliga grundvattentemperaturen i den kalla brunnen.



Figur 9. Temperaturberäkningar vid den varma respektive kalla brunnen under tidsperioden 5 år för det energibalanserade systemet.

5.2.2 Avsänkning/nivåökning

Den lägsta simulerade temperaturen från den varma brunnen var 8,7°C i slutet av vinterdriften år 5. Det beräknade maxflödet för att värmepumpsystemet ska täcka 50 % av maxeffekten beräknades därför till 63 l/s (temperaturskillnaden = 8,7°C - 4°C = 4,7°C). Avsänkning/nivåökning i jämförelse med ostörda nivåer visas med flöden 40 l/s under sommardriften och flöden 63 l/s under vinterdriften (figur 10).

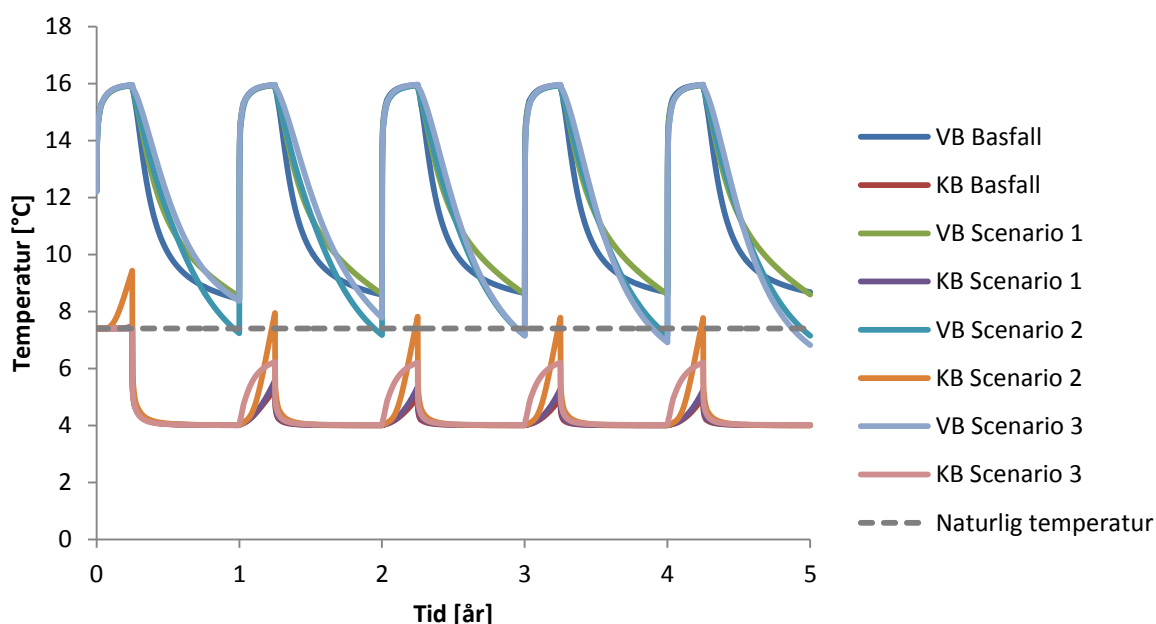


Figur 10. Avsänkning/nivåökning från ostörda grundvattennivåer för vinterdriften till vänster i bild och sommardriften till höger i bild. Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).

5.2.3 Andra brunnslägen och flöden

I figur 11 visas de simulerade temperaturerna hos den varma och den kalla brunnen för scenario 1-3. I scenario 1 har inget termiskt genomslag uppstått och temperaturerna vid den varma och kalla brunnen hålls relativt stabila. Dessutom tas generellt sett varmare vatten upp från den varma brunnen i jämförelse med det energibalanserade systemet (basfallet) (figur 11). Från energibalansberäkningarna fås även att mer värme urladdas än återladdas (tabell 12) Detta kan vara ett exempel på att geoenergisystemet inte behöver vara i balans då en naturlig återladdning samtidigt sker från grundvattentillrinningen.

I scenario 2 har ett termiskt genomslag uppstått då den kalla brunnen tar upp varmare vatten än den naturliga temperaturen på 7,4 °C och den varma brunnen tar upp kallare vatten än 7,4°C. Mot slutet av sommardriften tas temperaturer om ca 8 °C upp och mot slutet av vinterdriften temperaturer om ca 7 °C upp.



Figur 11. Temperaturberäkningar för den varma (VB) och den kalla brunnen (KB) för basfallet och scenario 1-3

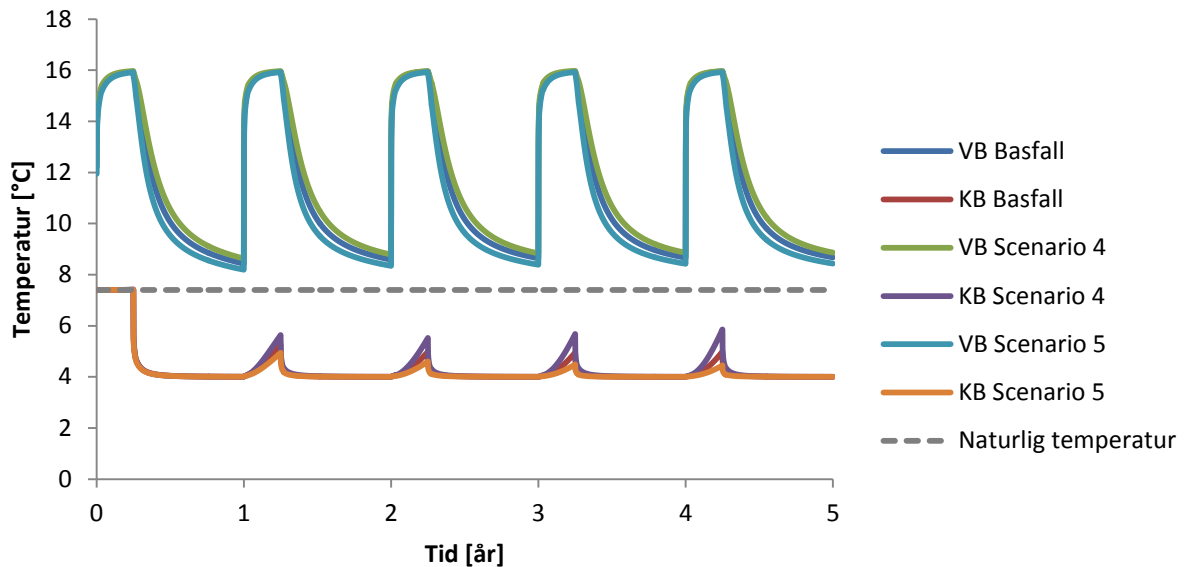
I scenario 3 har brunnarna bytt plats från ursprungsläget och med de använda flödena kan det ses att de upptagna temperaturerna från den varma brunnen avtar med åren, vilket tyder på att grundvattenmagasinet sakta kyls ner (figur 11). Detta kan ses i energibalansberäkningarna (tabell 12), där mer värme urladdas än återladdas. Tillskottet av grundvattenbildningen kommer framförallt från det södra randvillkoret och den naturliga återladdningen når därför inte den varma brunnen i lika stor grad som i övriga scenarier. Den naturliga återladdningen leder även till att en högre temperatur fås i den kalla brunnen i scenario 3 (figur 11) jämfört med om den kalla brunnen är placerad längre norrut (figur 7).

Tabell 11. Återladdad och urladdad energi för de olika scenarierna

Scenario	Återladdad energi vid sommar drift [GWh]	Urladdad energi under vinter drift [GWh]	Obalans [GWh]
Basfall	4,27	4,3	-0,03
1	4,24	4,77	-0,53
2	3,94	4,40	-0,46
3	3,82	4,35	-0,53
4	5,19	4,56	0,62
5	3,25	3,99	-0,74
6	4,36	5,92	-1,55
7	3,80	2,45	1,34

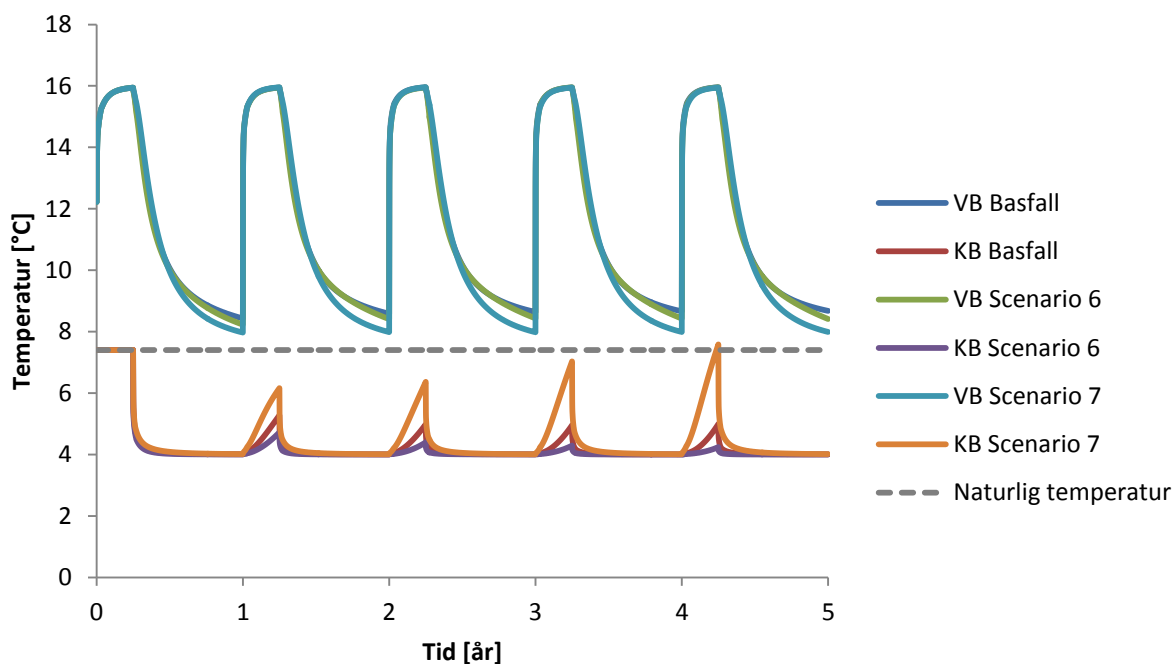
I scenario 4 och 5 ändras flöden för uttag och infiltration under sommar driften när energi återladdas. I scenario 4 ökades flödet och i scenario 5 minskades flödet. Hur mycket energi som återladdas påverkar även den energi som kan urladdas (tabell 12). Med ett högre flöde återladdas mer värme och mer värme kan därmed urladdas under vinter driften. Med ett lägre flöde återladdas mindre värme och mindre värme kan därmed urladdas för att användas. Från

temperaturgraferna kan ses att för scenario 4 stiger den upptagna temperaturen på grundvattenet från den kalla brunnen (figur 12). En successiv uppvärmning av akviferen sker därför, vilket även visar sig i energibalanstabellen med en obalans på 0,62 GWh (tabell 12). För scenario 5 kan ses att den upptagna temperaturen från den kalla brunnen sjunker en aning, dock till att ligga på en mer stabil nivå (figur 12). Energiobalansen visar att mer energi urladdas med 0,74 GWh för scenario 5, och temperaturerna kan hållas stabila då energi återladdas från den naturliga grundvattentillrinningen. Det krävs dock ett högre flöde under sommardriften för att mer värme ska kunna utvinnas under vinterdriften.



Figur 12. Temperaturberäkningar för den varma (VB) och den kalla brunnen (KB) för basfallet och scenario 4 och 5

I scenario 6 och 7 ändrades flödet för uttag och infiltration under vinterdriften när energi urladdas. I scenario 6 ökades flödet och i scenario 7 minskades flödet. Hur mycket energi som urladdas påverkar även den energi som kan återladdas (tabell 12). Med ett högre flöde urladdas mer värme och mer värme kan därmed återladdas under sommardriften. Den kalla och den varma brunnens upptagna temperatur är stabil under de fem år som simulerats, trots en energiobalans på 1,55GWh. Detta är också ett exempel på hur den naturliga återladdningen från grundvattenströmningen bidrar till att grundvattenmagasinets temperatur inte succesivt ökar eller minskar. Med lägre flöde urladdas mindre värme vilket gör att mindre energi kan återladdas. Den kalla brunnens upptagna temperatur för scenario 7, höjs succesivt under åren vilket leder till att grundvattenmagasinets naturliga temperatur långsamt stiger (figur 13).

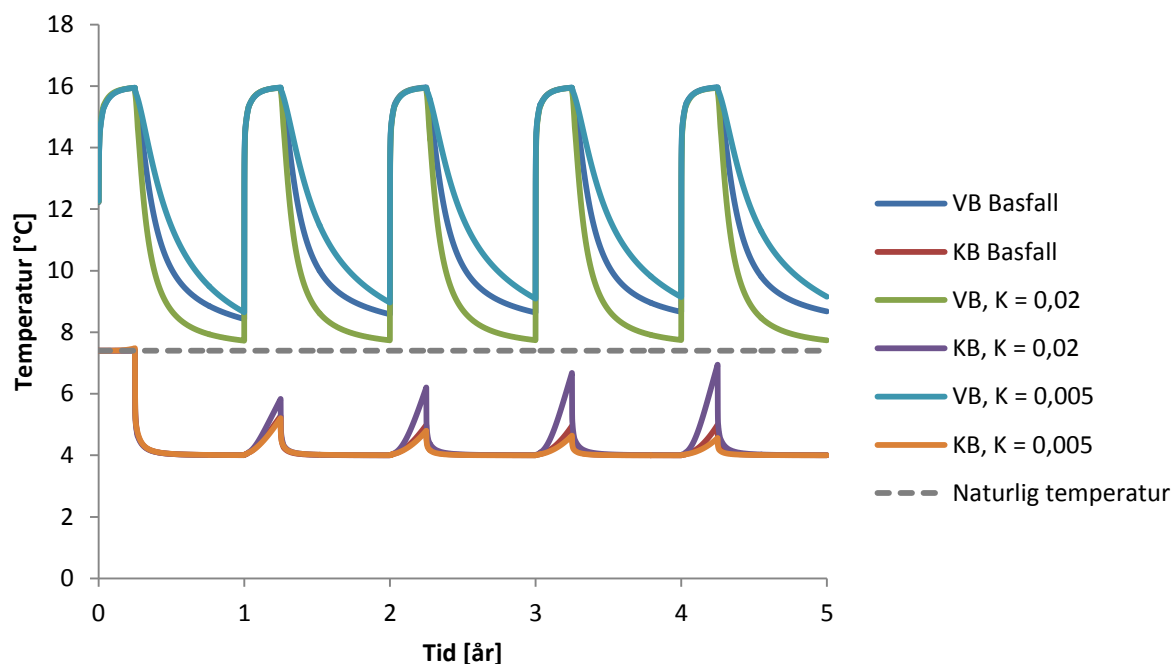


Figur 13. Temperaturberäkningar för den varma (VB) och den kalla brunnen (KB) för basfallet och scenario 6 och 7

5.2.4 Känslighetsanalys

5.2.4.1 Ändring av hydraulisk konduktivitet hos åsmaterialet

Modellen med en lägre hydraulisk konduktivitet ger en lägre temperatur vid uttag från den kalla brunnen och en högre temperatur vid uttag från den varma brunnen (figur 14). Detta för att en lägre konduktivitet ger ett mindre grundvattenflöde vilket gynnar energilagringen. Modellen med en högre hydraulisk konduktivitet hos åsmaterialet ger en högre temperatur vid uttag från den kalla brunnen och en lägre temperatur vid uttag från den varma brunnen. Detta för att en högre konduktivitet leder till ett större grundvattenflöde vilket missgynnar energilagringen.



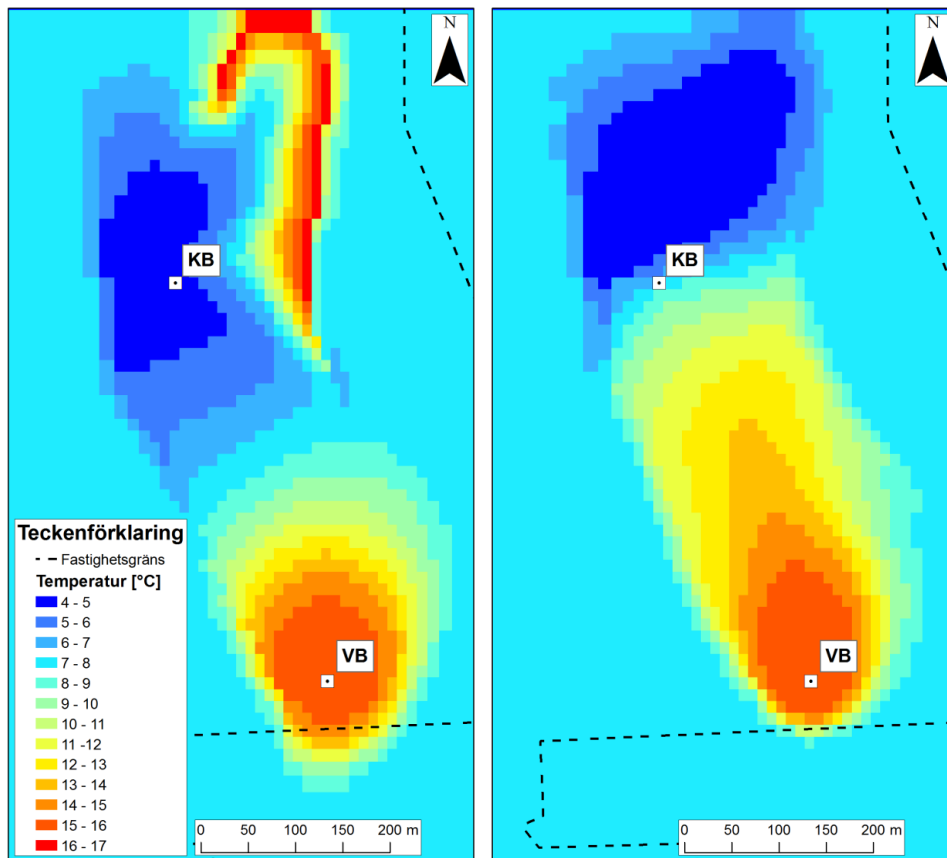
Figur 14. Temperaturberäkningar för kall (KB) och varm (VB) brunn för olika hydrauliska konduktiviteter (K, [m/s]).

Med en högre hydraulisk konduktivitet återladdas mer energi än vad som urladdas (tabell 13). En högre hydraulisk konduktivitet ger en snabbare grundvattenströmning och en större andel av den återladdade energin går därmed förlorad. Med en lägre hydraulisk konduktivitet är istället den urladdade energin större än den återladdade. Detta skulle på sikt innebära en sänkt medeltemperatur i akviferen. Modellen med en lägre hydraulisk konduktivitet visar ändå att mer energi kan lagras jämfört med en högre, detta till följd att ett högre grundvattenflöde innebär större energiförluster.

Tabell 12. Återladdad och urladdad energi vid olika hydrauliska konduktiviteter hos åsmaterialet

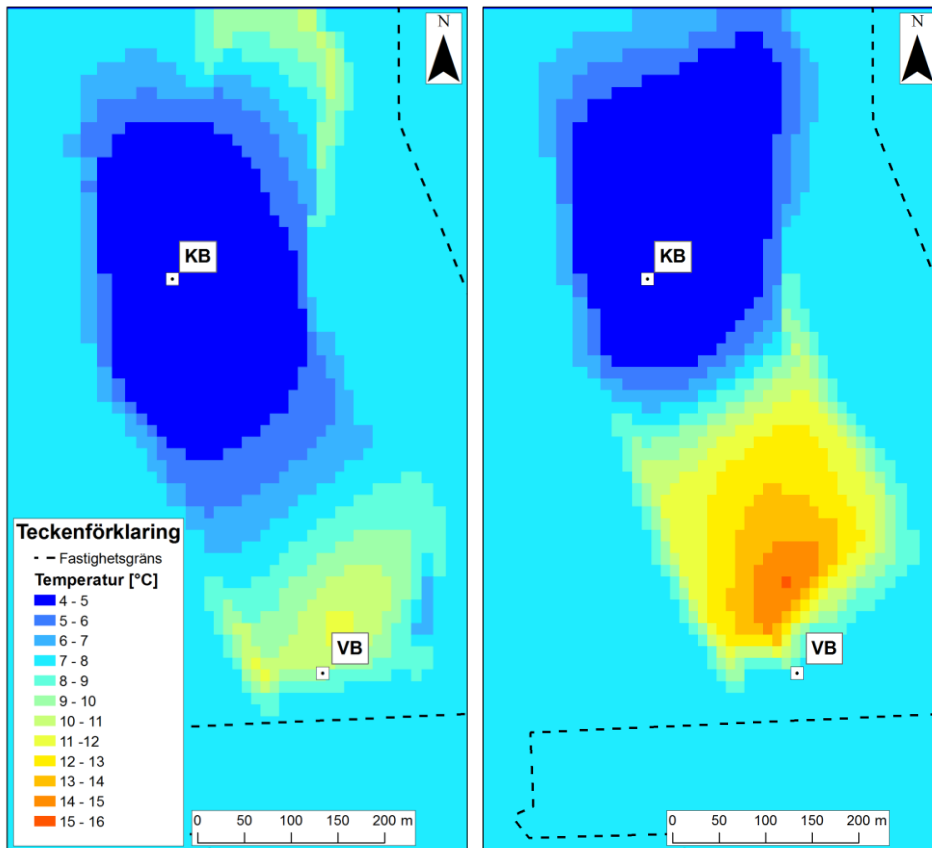
Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Återladdad energi vid sommar drift [GWh]	Urladdad energi under vinter drift [GWh]	Obalans [GWh]
0,02	3,99	3,44	0,55
0,011	4,27	4,30	-0,03
0,005	4,32	5,05	-0,73

För sommar drift år 5 kan ses att med en högre hydraulisk konduktivitet är den varma plymen mer utstäckt än med en lägre hydraulisk konduktivitet (figur 15). För en lägre hydraulisk konduktivitet ses en mer påtaglig inducerad infiltration från sjön Fysingen i modellens norra del, men någon temperaturpåverkan från sjön kan inte utläsas i temperaturgraferna.



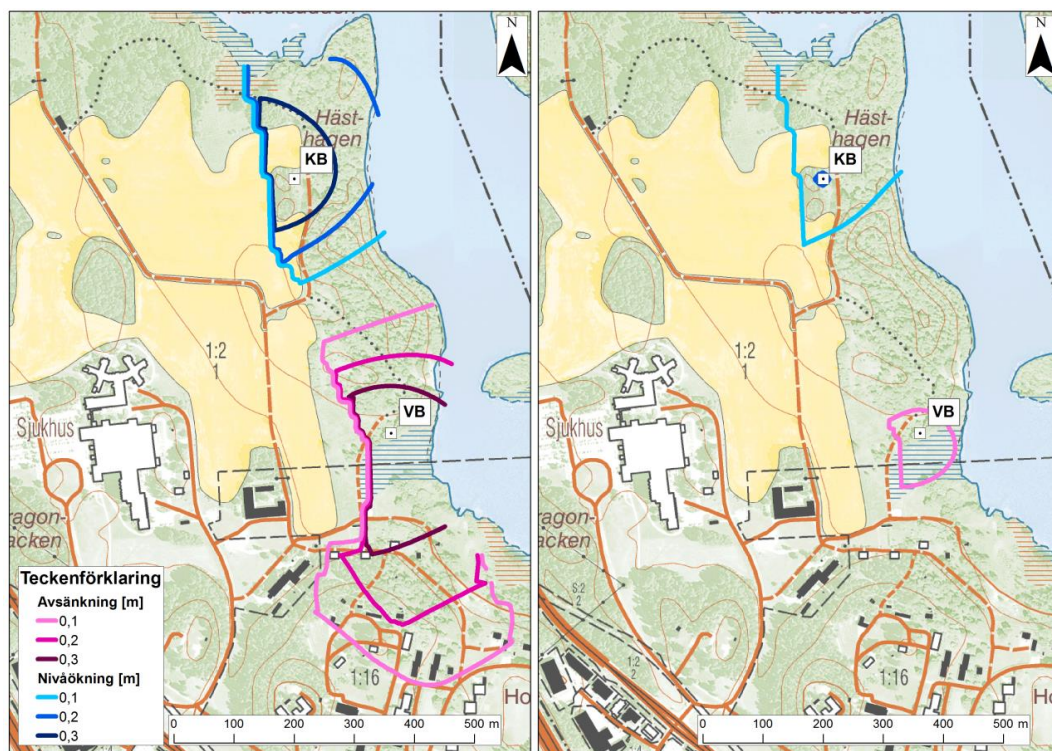
Figur 15. Slutet av sommar drift år 5 med $K = 0,005 \text{ m/s}$ i bilden till vänster och $K = 0,02 \text{ m/s}$ i bilden till höger.

För vinter drift år 5 kan ses att med en högre hydraulisk konduktivitet är den varma plymen mer utsträckt än den med en lägre hydraulisk konduktivitet (figur 16). Den hydrauliska konduktiviteten kan därför ha betydelse för om ett termiskt genomslag mellan varm och kall sida fås, där en högre hydraulisk konduktivitet ökar risk för genomslag och försvårar lagringen av energi.

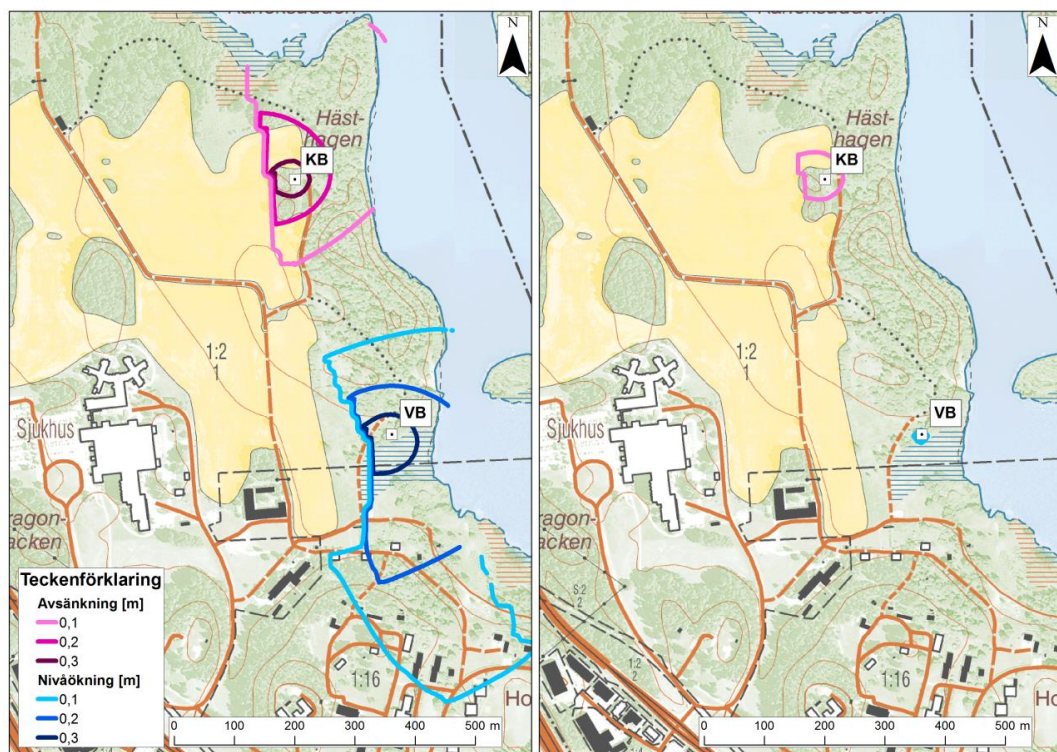


Figur 16. Slutet av vinterdrift år 5 med $K = 0,005 \text{ m/s}$ i bilden till vänster och $K = 0,02 \text{ m/s}$ i bilden till höger.

En lägre hydraulisk konduktivitet hos åsmaterialet ger en större avsänkning och nivåökning av grundvattennivåer än en högre hydraulisk konduktivitet (figur 17 & 18). Påverkansområdet som betecknas som avsänkning/nivåökning på 0,3 m kan ses sträcka sig utanför Löwenströmskas fastighetsgräns med en lägre hydraulisk konduktivitet.



Figur 17. Avsänkning/nivåökning av grundvattennivåer jämfört med ostört läge med $K = 0,005 \text{ m/s}$ i bilden till vänster och $K = 0,02 \text{ m/s}$ i bilden till höger för uttag/infiltration med 63 l/s. Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).



Figur 18. Avsänkning/nivåökning av grundvattennivåer jämfört med ostört läge med $K = 0,005 \text{ m/s}$ i bilden till vänster och $K = 0,02 \text{ m/s}$ i bilden till höger för uttag/infiltration med 40 l/s. Bakgrundskarta är fastighetskartan (©Lantmäteriverket, ärende nr MS2011/02599).

5.2.4.2 Ändring av total och effektiv porositet

Temperaturgrafer vid ändring av total och effektiv porositet redovisas ej då temperaturskillnaden var som högst 0,1 °C. Istället har energibalanser räknats ut från de beräknade temperaturerna vid förändring av total och effektiv porositet (tabell 14 och 15) och skillnaden är liten även här. En högre effektiv porositet verkar kunna leda till att mer energi kan urladdas och återladdas, medan en högre total porositet visar på att desto mindre energi kan urladdas och återladdas.

Tabell 13. Återladdad och urladdad energi vid ändring av den effektiva porositeten

Effektiv porositet [-]	Återladdad energi vid sommar drift [GWh]	Urladdad energi under vinter drift [GWh]	Obalans [GWh]
0,15	4,26	4,27	-0,01
0,20	4,27	4,30	-0,03
0,35	4,29	4,39	-0,10

Tabell 14. Återladdad och urladdad energi vid ändring av den totala porositeten

Total porositet [-]	Återladdad energi vid sommar drift [GWh]	Urladdad energi under vinter drift [GWh]	Obalans [GWh]
0,20	4,27	4,32	-0,05
0,25	4,27	4,30	-0,03
0,40	4,25	4,25	0

6. DISKUSSION

6.1 DEN HYDRAULISKA MODELLEN

Den hydrauliska modellen ger en storskalig bild av hur systemet förväntas fungera och därmed ger den en bedömning av hur mycket energi som går att säsongslagra och utvinna ur åsakviferen. Den hydrauliska modellen är dock en förenklad bild av ett komplext system och den bygger på ofullständiga underlagsdata. Uppskattningar av bergöverytans läge, jordlagerföljder, mäktigheter och randvillkor är grova. Berggrunden har interpolerats utifrån antaganden om berg/block-nivån baserad på endast 4 punkter. Det saknas användbara grundvattennivåer och rörborrningar norr och söder om undersökningsplatsen. Var utflödet från åsen sker under naturliga förhållanden är osäkert då observationer av grundvattennivåerna saknas längre norrut.

Grundvattennivåerna som använts för att kalibrera modellen baseras på mätningar som gjorts vid ett tillfälle. Dessa grundvattennivåer representerar därför inte ett medelvärde av magasinets grundvattennivåer. Stora osäkerheter ligger i hur randvillkoret för vattendrag har applicerats på sjön Fysingen. Då detta randvillkor ligger nära de observerade grundvattennivåerna har det stor inverkan på kalibreringen.

6.2 DET FIKTIVA GEOENERGILAGRET

Från det scenario som presenteras kan ca 4,3 GWh värme respektive kyla lagras i akviferen. Med ett värmepumpsystem ger detta att ca 85 % av Löwenströmska sjukhusets årliga värmebehov kan täckas och hela kylbehovet. Modelleringen visar på att det är möjligt att utvinna en värmeeffekt på 1226 KW med ett maxflöde om 63 l/s. Löwenströmska sjukhusets behov av kyla är mycket mindre än värmebehovet. Fastigheter har ofta inte energibalans mellan värme och kylbehov, men ett geoenergisystem behöver vara i ungefärlig energibalans. Den kyla som det inte finns behov för hos en fastighet måste därför tas om hand om på annat sätt. Det kylda grundvatten som inte behövs till fastigheten skulle t.ex. kunna värmas upp av ytvatten eller solpaneler för att sedan återföras till akviferen igen för att skapa energibalans.

Hur stor den naturliga grundvattenströmningen är i akviferen påverkar geoenergilagret. Ett högre grundvattenflöde, här simulerat med en högre hydraulisk konduktivitet hos åsmaterialet, försvårar lagringen av energi. Den höga hydrauliska konduktivitet som användes i modelleringen var 0,02 m/s. Detta värde är högre än medelvärdet hos subakvatiska åsar som ligger i storleksordningen 10^{-3} m/s. Den hydrauliska konduktivitet som användes i basfallet, 0,011 m/s, är beräknat endast utifrån två mätpunkter och är även den hög jämfört med medelvärdet hos subakvatiska åsar. Då den hydrauliska konduktiviteten påverkar modelleringen av ett geoenergilager väsentligt är fler mätvärden önskvärda för att ge en mer korrekt bild av systemet. En lägre hydraulisk konduktivitet gynnar energilagringen, men ju större blir påverkansområdet till följd av pumpning. I simuleringarna har endast två brunnar använts. För att optimera systemet skulle fler brunnar kunna användas där ett mindre flöde från samtliga brunnar skulle kunna användas för att uppnå samma effekt. Dessutom skulle fler brunnslägen kunna testas.

Det intervall som totala och effektiva porositeten kan antas variera inom åsmaterialet har inte någon större betydelse för den simulerade geoenergilagringen. Porositetens betydelse vid olika stora grundvattenflöden har dock inte undersökts. Övriga inparametrars inverkan på det fiktiva geoenergilagret som används i MT3DMS har inte testats, t.ex. dispersivitets betydelse.

Simuleringarna har gjorts med sommar drift i 3 månader och vinter drift i 9 månader. Om sommar driften och/eller vinter driften skulle pågå i en kortare period kan större medelflöden eller temperaturskillnader komma att behövas för att lagra samma energimängd.

Hammarbys vattentäkt är inte med i simuleringarna. Om Hammarbys vattentäkt skulle vara igång, med uttagsmängder enligt tillstånd, skulle det förmodligen leda till ett minskat grundvattenflöde till det fiktiva geoenergilagret vid Löwenströmska eftersom vattentäkten ligger uppströms, vilket skulle påverka tillgång på grundvatten och möjligtvis avsänkningarna och nivåökningarna.

Mer värme kan förmodligen urladdas från geoenergilagret än vad som återladdas då den naturliga återladdningen från grundvattenströmningen motverkar att grundvattnets temperatur i akviferen kyls ned. Detta har påvisats i en del av de scenarier som gjorts med olika brunnspaceringar för den varma och den kalla brunnen samt olika flöden som använts vid uttag/infiltration. Där den urladdade energin har varit större än den återladdade har den uttagna temperaturen från den varma och den kalla brunnen varit relativt stabil, vilket kan tyda på att temperaturen i akviferen inte successivt höjs eller sänks mellan åren.

Det går att minska avståndet mellan den varma och den kalla brunnen jämfört med den placering de har i det energibalanserade systemet om så skulle vara önskvärt av praktiska eller ekonomiska skäl. Med en tätare placering (scenario 1) kan mer värme än kyla utvinnas utan att det sker en succesiv höjning eller sänkning av grundvattnets temperatur i åsen på grund av den naturliga återladdningen. En alltför nära placering av brunnarna kommer dock att leda till att ett termiskt genomslag uppstår, men beroende på vilket energisystem som används, d.v.s. vilka arbetstemperaturer som kan användas för att utvinna värme eller kyla behöver det inte vara ett problem. Det gäller att se till att de upptagna temperaturerna vid brunnarna hålls på en stabil nivå så att akviferens grundvattentemperatur inte successivt ökar eller minskar vilket skulle kunna leda till att kyla eller värme till slut inte kommer att gå att utvinna. Det är en iterativ process att få ett system i energibalans där flödenas storlek är av betydelse. Andra brunnslägen är möjliga och genom att justera flöden kan system med andra brunnslägen fås i energibalans.

6.3 FÖRSLAG TILL VIDARE STUDIER

Ytterligare undersökningar angående geologi (t.ex. bergnivå, jordlagerföljder, åsens utsträckning) och hydrologi (t.ex. flöden, grundvattennivåer över en längre tidsperiod) är önskvärda för att förbättra och förfina modellen. En långtidsprovpumpning med och utan återinfiltration är önskvärd för att bestämma åsens hydrauliska egenskaper och gränser.

En känslighetsanalys skulle kunna göras på övriga inparametrar som används i MT3DMS för att se hur de påverkar resultatet.

Huruvida ett geoenergilager för Löwenströmska sjukhuset skulle vara ekonomiskt hållbart kan vara intressant att studera, då det verkar som att möjligheterna är goda till att ett geoenergilager kan appliceras inom fastighetsområdet.

7. SLUTSATS

Utifrån den hydrauliska modell som byggts upp visar den del av Stockholmsåsen som ligger inom Löwenströmskas fastighetsområde goda möjligheter till att säsongslagra energi för utvinning av värme och kyla. Den hydrauliska modellen är byggd på en rad förenklingar och ytterligare undersökningar angående geologi och hydrogeologi är önskvärda för att på ett mer korrekt sätt förstå hur grundvattensystemet fungerar. Modellen kan ändå anses användbar till att ge en bedömning av hur mycket energi som potentiellt går att lagra.

Från det energibalanserade system som har simulerats kan ca 4,3 GWh värme och kyla lagras under året med en möjlig maxeffekt på 1226 KW för utvinning av värme med ett flöde på 63 l/s. Detta gör att geoenergilagret, tillsammans med ett värmepumpsystem, kan generera 85 % av den årliga värmeenergin som Löwenströmska sjukhuset behöver och samtlig kylenergi som sjukhuset behöver. Då Löwenströmska sjukhusets värmebehov är mycket större än dess kylbehov, måste dock den kyla som inte sjukhuset behöver tas om hand om på annat sätt för att säkerställa att geoenergilagret är i någorlunda energibalans. En viss energiobalans är godtagbar då akviferen återladdas med grundvattenbildningen och grundvattenströmningens naturliga grundvattentemperatur.

Brunnarnas placering har betydelse för vilka flöden som behövs för att skapa energibalans. En alltför tät placering av brunnarna leder till ett termiskt genomslag.

Hur stort grundvattenflödet är genom åsen påverkar det fiktiva geoenergilagret. Bland annat gör en högre hydraulisk konduktivitet hos åsmaterialet att energilagringen försvåras till följd av större energiförluster. En lägre hydraulisk konduktivitet gynnar energilagringen, men ger desto större avsänkningar/nivåökningar. Den totala och den effektiva porositeten hos åsmaterialet har ingen större betydelse för energilagringen.

8. REFERENSER

- Allmänna ingenjörskyrån, 1978. *Värmelagring i naturliga grundvattenmagasin*. Stockholm: Nämnden för energiproduktionsforskning
- Anderson, M.P., Woessner, W., 1992. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press Inc
- Andersson, O., inget datum. *AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE*. Tillgänglig i: Paksoy, Halime Ö. (2007). *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption [elektronisk resurs]: Fundamentals, Case Studies and Design*. Dordrecht: Springer
- Blomqvist, T. & Tistad, L., 1998. *Förorening av vattentäkt vid vägtrafikolycka*, Vägverket publikation 1998:064
- Carlsson, L., & Gustafson, G., 1984. *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning
- Claesson, J., Efring B., Eskilson, P., och Hellström, G., 1982. *Markvärme – En handbok om termiska analyser*. Byggnadsforskningsrådet
- Cobb, F., 2009. *Structural Engineer's Pocket Book*, 2. uppl. Elsevier Ltd
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W., 1990. *Physical and chemical hydrogeology*, John Wiley & sons.
- Fetter, C.W., 1994. *Applied hydrogeology*. 3. uppl. Upper Saddle River: Prentice Hall
- Fletcher, G., 1986. *Groundwater and wells*. 2. uppl., Johnson Division, Minnesota
- Guo, W., & Langevin, C.D., 2002, User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources
- Gustafson, G., 1978. *Studies of the hydrogeology of subaqueous eskers*. Diss. Göteborg: Chalmers tekn. högsk.
- Hallström, E., 2011. Geoenergi: Möjligheter och förutsättningar för geoenergi i Jönköping och Huskvarna, Länsstyrelsen i Jönköping län, 2011:22, Jönköping
- Harbaugh, A. W., 2005. *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process*, U.S. Geological Survey Techniques and methods 6-A16.
- Ingelstam, E., Sjöberg, S., & Rönngren, R., 1993. *TEFYMA: handbok för teknisk fysik, fysik och matematik*. 3. uppl. Helsingborg: Sjöberg
- Jonsson, H. & Bohdanowicz, P., 2005. *Sustainable energy utilisation*. Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Energy Technology

- Knutsson, G., Morfeldt, C., 1993. *Grundvatten – teori & tillämpning*. AB Svensk Byggtjänst
- Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., & Guo, W., 2008, *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport*: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6
- Lee, K.S., 2013. *Underground Thermal Energy Storage [Elektronisk resurs]*. London: Springer London
- Ma, R. & Zheng, C., 2010. *Effects of density and viscosity in modeling heat as a groundwater tracer*, Ground Water, doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00660.x.
- Probert, T., 1995. *Aquifer thermal energy storage: modelling and validation against field experiments*. Lic.-avh. Lund : 1995
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J. & Pers, C., 2006. *Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell*, Hydrologi, Series A no 66 Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Schlumberger Water Services, inget datum., [online] Tillgänglig på:
< http://www.swstechnology.com/pdfs/VMOD_Flex_WhitePaper_Grid_Types.pdf > [Hämtad 2014-01-12].
- SGU, 2013a, Jordartskarta, 1:50 000, Framställd från SGUs databas 2013-10-15 med id-nr: 7yhOgBfeCc
- SGU, 2013b, Berggrundskarta, 1:50 000, Framställd från SGUs databas 2013-10-15 med id-nr: Irg7U2CVkr
- SGU, 2013b, Grundvattenkarta , 1:50 000, Framställd från SGUs databas 2013-10-15 med id-nr: W2ETQ7KxT
- Sundberg, J., 1991. *Termiska egenskaper i jord och berg*. Statens geotekniska institut
- VIAK, 1981. *Grundvattenvärme vid Löwenströmska sjukhuset. Geohydrologiska förutsättningar*. Rapportnummer 4912.2931
- Zheng, C. & Wang, P., 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, US army Corps of Engineers.
- Zheng, C., 2010, *MT3DMS v5.3 Supplemental User's Guide*, Technical Report to the U.S. Army Engineer Research and Development Center, Department of Geological Sciences, University of Alabama, 51 p.

Personliga kontakter

Hägg, Michael, 2014. Uppdragsledare inom Geoenergi, Sweco. [muntligt] (personlig kommunikation 2014-01-30 till 2014-09-08)

Karlsson, Annika, 2014. Energicontroller, Locum. Givit information angående Löwenströmskas energi- och effektbehov från Fortums timavläsning. [email och telefon] (Personlig kommunikation 2014-09-12)

BILAGA – Hydrogeologiska parametervärden från litteraturen

Jordart eller berg	Effektiv porositet [-]	Referens	Total porositet [-]	Referens
Lera	0,1	Antagen	0,45 - 0,55	Fletcher, 1986
Sand	0,15 - 0,25 (0,20)	Blomqvist & Tistad, 1998	0,25 - 0,40	Fletcher, 1986
Berg	0,0001 - 0,01 (0,005)	Blomqvist & Tistad, 1998	<0,01	Fletcher, 1986
Morän	0,01 - 0,15 (0,08)	Blomqvist & Tistad, 1998	0,15 - 0,45	Sundberg, 1991
Ås	0,15 - 0,35 (0,25)	Blomqvist & Tistad, 1998	0,25 - 0,40	Fletcher, 1986

Jordart eller berg	Hydraulisk konduktivitet x- och y-led [ms^{-1}]	Hydraulisk konduktivitet z-led [ms^{-1}]	Referens
Lera	10^{-8} - 10^{-11}	-	Knutsson & Morfeldt, 1993
Morän	10^{-8} - 10^{-6} (10^{-7})	$5 \cdot 10^{-9}$ - $5 \cdot 10^{-7}$ ($5 \cdot 10^{-8}$)	Blomqvist & Tistad, 1998
Berg	10^{-9} - 10^{-3} (10^{-6})	10^{-9} - 10^{-3} (10^{-6})	Blomqvist & Tistad, 1998
Sand	10^{-5} - 10^{-3} (10^{-4})	10^{-5} - 10^{-3} (10^{-4})	Blomqvist & Tistad, 1998
Ås	10^{-5} - 10^{-5} (10^{-3})	10^{-6} - 10^{-2} (10^{-4})	Blomqvist & Tistad, 1998

Jordart eller berg	Sy [-]	Referens	Ss [m^{-1}]	Referens
Lera	0,01 - 0,1	Fletcher, 1986	$2 \cdot 10^{-2}$ - $9,2 \cdot 10^{-4}$	Anderson & Woessner
Sand	0,1 - 0,3	Fletcher, 1986	10^{-3} - $1,3 \cdot 10^{-4}$	Anderson & Woessner
Berg	-	-	$< 3,3 \cdot 10^{-6}$	Anderson & Woessner
Morän	-	-	-	-
Ås	0,2	Antagen	10^{-4} - $4,9 \cdot 10^{-5}$	Anderson & Woessner, (sandigt grus)