

MSc Thesis, 30 ECTS  
ISRN LUTVDG/(TVTG--5153)/1-78/(2017)

# Grundvattensänkning vid schakter och byggnadsverk

En jämförelse av olika beräkningsmetoder

Philip Håkansson  
Teknisk geologi  
Lunds Tekniska Högskola  
Lunds Universitet





Thesis work for Master of Science 30 ECTS  
Environmental Engineering

**Grundvattensänkning vid schakter och byggnadsverk**  
**En jämförelse av olika beräkningsmetoder**

**Groundwater lowering at excavations and constructions**  
**A comparison of different calculation methods**

**Philip Håkansson**  
Teknisk Geologi/Engineering Geology  
Lunds Tekniska Högskola/Faculty of Engineering  
Lunds Universitet/Lund University

Lund 2017

Handledare/Supervisors:  
Gerhard Barmen, Teknisk Geologi  
Pontus Siesing, Sweco Environment AB  
Mattis Johansson, Sweco Environment AB

Examinator/Examiner  
Jan-Erik Rosberg, Teknisk Geologi

**Författare:**

Philip Håkansson, 1991 -

**Titel:**

Grundvattensänkning vid schakter och byggnadsverk -  
En jämförelse av olika beräkningsmetoder

**Title:**

Groundwater lowering at excavations and constructions-  
A comparison of different calculation methods

68 sidor + 1 bilaga (2 Sidor)

39 figurer

19 tabeller

## Förord

Detta examensarbete avslutar mina studier på civilingenjörsutbildningen i ekosystemteknik vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Examensarbetet motsvarar 30 högskolepoäng och har genomförts på Sweco Environment AB och Teknisk geologi på LTH under vårterminen 2017.

Jag vill tacka min handledare Gerhard Barmen på LTH för hjälp och stöd under arbetets gång samt mina handledare på Sweco, Pontus Siesing och Mattis Johansson, för stöd och diskussioner kring arbetets upplägg. Jag vill även rikta ett tack till Robertus Hoogeven för stöd vid de numeriska beräkningarna samt för de inspirerande diskussionerna. Jag vill även tacka alla på geologi- och grundvattengruppen på Sweco Environment AB i Malmö för att de fått mig att känna mig välkommen samt för många goda råd och roliga stunder.

Slutligen vill jag uttrycka min uppskattning till mina föräldrar som stöttat mig genom hela livet och även genom detta arbete.

*Philip Håkansson*

*Lund, Augusti 2017*

## Abstract

Many construction projects, entail excavations into water-bearing soils. As a consequence of this a groundwater lowering must be made which can cause major environmental impacts, such as drainage of adjacent rivers or wetlands or subsidence of adjacent buildings. The groundwater that flows into the excavation is also of importance since it determines the volume of water that has to be pumped away during the project. In recent years, Sweco Environment AB has had a need to come up with a strategy that will enable them to more systematically handle projects that deals with shallow excavations into water-bearing soils. The purpose of this thesis is to investigate and compare different calculation methods for inflow and radius of influence when excavating for an underpass. Two cases have been studied, a real case provided by Sweco for an excavation in Lorensborgsgatan and a theoretical case. The excavation for the theoretical case assumed to be located in shallow Quaternary deposits.

The groundwater flow and the radius of influence were calculated using both analytical and numerical models. Five analytical equations were used to calculate the inflow and one equation was used to calculate the radius of influence. The numerical models were made in SEEP/W and GMS MODFLOW. Sensitivity analyses have been conducted which indicated that the hydraulic conductivity has a major impact on the results of both the analytical and the numerical models.

The calculation results from the analytical equations and from the numerical models showed large differences. In the case of Lorensborgsgatan, estimated inflows were between 0,3 and 6,7 m<sup>3</sup>/d with a radius of influence varying between 11 and 110 meters and for the theoretical case, the inflows were estimated between 38 and 9045 m<sup>3</sup>/d with a radius of influence varying between 180 and 1498 meters.

As the results show, the magnitudes for the theoretical case were larger than for Lorensborgsgatan which can be explained by the higher hydraulic conductivity of the layers present in the theoretical case. A higher order of magnitude increases the need to more accurately determine key input parameters since a small difference in input parameters leads to large differences in the calculated results and thus also large differences in cost.

Since no actual observed inflows or radii of influence were available, no clear method recommendation could be made. However, it appears that GMS works better than SEEP/W at numerical modeling of underpasses, mostly due to the simplicity of the calibration and validation steps in the program, which enabled a higher degree of credibility to the models. Nevertheless, an analytical calculation method should be chosen before a numerical one in situations where no further requirements, such as dynamic solutions, needs to be addressed or in cases where the hydraulic parameters indicate less permeable soils.

Key words: Groundwater, Modeling, Dewatering, GMS, SEEP/W, MODFLOW, Excavation.

## Sammanfattning

Många byggnadsprojekt innefattar utgrävningar i vattenbärande jordar. Konsekvensen av detta är att en grundvattensänkning måste göras vilket kan orsaka stor påverkan på den omkringliggande miljön, bland annat kan intilliggande naturvärden såsom åar och våtmarker påverkas eller så kan sättningar uppstå vid intilliggande byggnader. Grundvattnet som flödar in till schaktet kommer att behöva pumpas bort vilket innebär att det är av intresse att ta reda på hur mycket vatten som förväntas flöda in. Ett behov har funnits av att hitta den arbetsgång som lämpar sig bäst för grundvattensänkning för anläggning av ytliga schakt. Syftet med det här arbetet är att undersöka och jämföra olika beräkningsmetoder för inflöde och influensområde när schakt ska konstrueras för planskild korsning. Två olika fall har studerats, ett verkligt fall från Sweco för en planskild korsning vid Lorensborgsgatan i Malmö och ett teoretiskt fall. Schaktet för det teoretiska fallet antogs vara placerat i ytliga kvartära avlagringar.

Grundvatteninflödet och influensområdet för de båda fallen beräknades med olika analytiska och numeriska modeller. Fem analytiska ekvationer användes för att beräkna inflödet och en ekvation för att beräkna influensområdet. De numeriska modelleringarna gjordes i programmen SEEP/W och GMS MODFLOW. Känslighetsanalyser har genomförts vilka visar på att den hydrauliska konduktiviteten har en stor inverkan på både de analytiska och numeriska modellernas resultat. För de numeriska beräkningarna spelar även mäktigheten av de mer vattenförande lagren stor roll.

Beräkningsresultaten från de analytiska ekvationerna och från de numeriska modellerna visade på stora skillnader. För fallet med Lorensborgsgatan låg beräknade inflöden mellan 0,3-6,7 m<sup>3</sup>/d och influensområden mellan 11-100 meter och för det teoretiska fallet beräknades inflöden mellan 38-9045 m<sup>3</sup>/d och influensområden mellan 180-1498 meter.

Som resultaten visar blev storleksordningarna för det teoretiska fallet större än för Lorensborgsgatan vilket bland annat har sin förklaring i att materialen för det teoretiska fallet har högre hydraulisk konduktivitet. En högre storleksordning ökar behovet av att mer exakt bestämma viktiga indataparametrar eftersom små skillnader i parametrar kan ge stora skillnader i beräkningsresultaten och därmed också stora kostnadsskillnader.

Eftersom inga verkligt beräknade inflöden eller influensområden fanns tillgängliga kunde inga tydliga metodrekommendationer göras. Däremot framgick det att GMS fungerar bättre än SEEP/W vid numerisk modellering av planskild korsning, mest på grund av enkelheten vid kalibrerings- och valideringsstegen vilket gav mer trovärdiga modeller. Trots det bör en analytisk beräkningsmetod väljas framför en numerisk vid situationer då inga ytterligare krav, exempelvis framtidsscenario, ställs på lösningen, eller för fall då de hydrauliska parametrarna visar på mer täta förhållanden.

Nyckelord: Grundvatten, Modellering, Avsänkning, GMS, SEEP/W, MODFLOW, Schakt.

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b>1</b>
1.1	BAKGRUND	2
1.2	SYFTE	3
1.3	AVGRÄNSNING	4
<b>2</b>	<b>TEORI</b>	<b>5</b>
2.1	GRUNDVATTENBILDNING	5
2.2	GRUNDVATTENSTRÖMNING	5
2.3	DUPUIITS ANTAGANDEN	7
2.4	HYDRAULISKA OCH MEKANISKA EFFEKTER AV PLANSKILD KORSNING	8
2.5	PERMANENT GRUNDVATTENSÄNKNING	8
2.6	VAL MELLAN ANALYTISK OCH NUMERISK BERÄKNINGSMETOD	9
<b>3</b>	<b>ANALYTISKA METODER</b>	<b>11</b>
3.1	THIEMS BRUNNSEKVATION	11
3.2	BERÄKNING AV INLÄCKAGE OCH INFLUENSOMRÅDE	13
<b>4</b>	<b>NUMERISKA METODER</b>	<b>16</b>
4.1	METOD	16
4.2	STATIONÄR & DYNAMISK MODELL	17
4.3	FINITA ELEMENT- OCH FINITA DIFFERENSMETODEN	17
4.4	SEEP/W	18
4.5	GMS MODFLOW	19
<b>5</b>	<b>KONCEPTUELLA MODELLER</b>	<b>20</b>
5.1	LORENSBORGSGATAN	20
5.2	TEORETISKT FALL	26
<b>6</b>	<b>ANALYTISKA BERÄKNINGAR</b>	<b>29</b>
6.1	BERÄKNING AV INFLÖDE OCH INFLUENSOMRÅDE	29
6.2	KÄNSLIGHETSANALYS	30
<b>7</b>	<b>NUMERISKA BERÄKNINGAR I SEEP/W</b>	<b>31</b>
7.1	LORENSBORGSGATAN	31
7.2	TEORETISKT FALL	36
<b>8</b>	<b>NUMERISKA BERÄKNINGAR I GMS</b>	<b>39</b>
8.1	LORENSBORGSGATAN	39
8.2	TEORETISKT FALL	45
<b>9</b>	<b>RESULTAT OCH DISKUSSION</b>	<b>47</b>



<b>9.1</b>	<b>LORENSBORGSGATAN</b>	<b>47</b>
<b>9.2</b>	<b>TEORETISKT FALL</b>	<b>51</b>
<b>9.3</b>	<b>JÄMFÖRELSE - NUMERISKA OCH ANALYTISKA RESULTAT</b>	<b>55</b>
<b>9.4</b>	<b>NUMERISKA MODELLFÖRBÄTTRINGAR</b>	<b>60</b>
<b>9.5</b>	<b>ANALYTISKA MODELLFÖRBÄTTRINGAR</b>	<b>61</b>
<b>9.6</b>	<b>VAL AV METOD</b>	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER</b>	<b>64</b>
<hr/>		
	<b>REFERENSLISTA</b>	<b>65</b>
<hr/>		
	<b>APPENDIX: KALIBRERINGSDATA OCH VALIDERINGSDATA FÖR LORENSBORGSGATAN.</b>	<b>67</b>
<hr/>		



## 1 Inledning

Människan har under lång tid försökt kontrollera och förutse vattnets flödesvägar och beteendemönster. Samtidigt som de första akvedukterna och vattenreservoarerna konstruerades, vilka framförallt användes till dricksvattenförsörjning, uppstod tanken hur man skulle kunna omvandla vattenmättade kärr till odlingsbar jordmark. Idén om avvattning av jordbruksmarker används än idag och principen för bortledning av vattnet måste tas i beaktande i många av dagens hus och infrastrukturprojekt där byggande sker under grundvattenytan (Powers, 2007). Urbanisering och förtätning av storstäder sätter också stor press på utformningen av husbyggande och infrastrukturprojekt. Ytor som tidigare ansågs olämpliga ur anläggningssynpunkt på grund av vattenförekomster används idag för byggande av bostäder och vägar vilket ökar behovet av att tydligt kunna förutse förändringar i grundvattnet och hur det påverkar den omkringliggande miljön.

Enligt Powers (2007) är det viktigt att tidigt undersöka och förutspå grundvattnets påverkan på infrastrukturprojekt som är belägna under markytan, vilken annars kan skapa stora konsekvenser för konstruktionsprocessen och på den totala kostnaden. Ett förbiseende av grundvattnets påverkan kan orsaka stor skada och kräva ombyggnader sent in i byggprocessen vilket ofta leder till stora extrakostnader.

Två viktiga parametrar vid utformningen av ett avvattningssystem är det totala förväntade grundvatteninflödet i det öppna schaktområdet och storleken på influensområdet som skapas på grund av avsänkningen (Aryafar et al. 2009). Förväntas arbete ske under grundvattenytan bör avsänkningen ske i så stor utsträckning att arbetsytan hålls torr. Det inflödande vattnet ger svar på de vattenvolymer som måste pumpas bort och därigenom uppskattningar på pumpdimensioner och brunnutformning. Ett stort influensområde kan ge upphov till påverkan på omkringliggande brunnars uttagskapaciteter, byggnaders sättningsbenägenheter och natur och miljö. Hur mycket avsänkningen påverkar det omkringliggande området ger också en förvarning om eventuella tillståndsansökningar för avvattningen måste göras (SGU, 2017). Dessa parametrar förväntas ofta uppskattas tidigt i projekt när tillgången till indata är begränsad.

Beräkningarna av inflöde och influensområde kan göras med analytiska eller numeriska metoder. Analytiska lösningar är baserade på ett antal förenklingar och randvillkor vilka begränsar deras användande i olika avvattningssituationer. Numeriska lösningar är mer mångsidiga och har en potentiellt bättre chans att beskriva fler och mer invecklade hydrogeologiska system. En numerisk modell bör i de flesta komplexa situationer vara överlägsen en analytisk när det kommer till att beskriva grundvattenpåverkan vid avvattning, men beroende på tillgänglig indata och dess ursprung tillsammans med de hydrogeologiska förutsättningarna kan en analytisk lösning ge fullt användbara resultat. Aryafar et al. (2009) visade prov på detta genom att modellera grundvatteninflödet från en sluten akvifer till det öppna gruvbrottet Sangan i nordöstra Iran med programvaran SEEP/W och jämföra resultaten med analytiska värden.

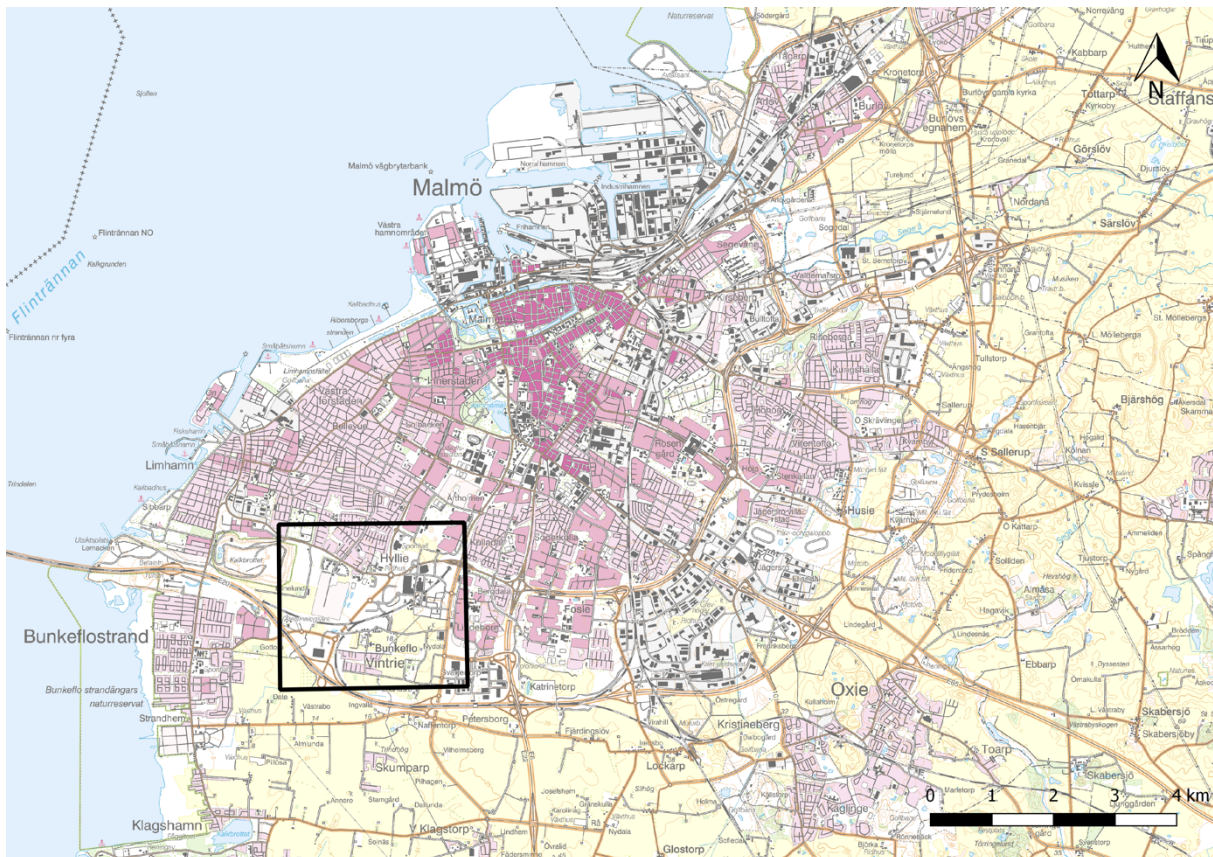
Avvattningsfrågan vid anläggning av ytliga schakt är ett generellt problem och Sweco Environment AB har på senare tid arbetat mycket med planskilda korsningar och arbetsgången, när det kommer till beräkning av inflöde och influensområde, har skilt sig åt vid olika projekt. Det finns därför ett behov att kunna hitta optimala lösningar för situationsspecifika fall då byggande av planskilda korsningar sker under grundvattenytan.

## 1.1 Bakgrund

Med begreppet planskild korsning menas att gång – cykel – eller biltrafik förs planskilt antingen på bro över eller i port under korsande bil- eller tågtrafik (Moberg & Skagersjö, 2004). I fallet GCR-korsning menas gång- cykel- och ridväg. För fallet då den planskilda vägen hamnar i port under korsande bil- eller tågtrafik behöver en schaktning ske. Om schaktets lägstanivå under byggskedet hamnar under den förväntade grundvattenytan kan problem uppstå med vattenansamlingar i schaktet. Vidare bör vid dessa fall den påverkan som grundvattensänkningen har på sin omgivning undersökas. Detta för att säkerställa att funktionen av betydelsefulla vattenresurser i omgivningen förblir oförändrade.

### 1.1.1 Lorensborgsgatan

Området kring GCR-tunneln vid Lorensborgsgatan ligger i sydvästra Malmö precis invid väg E22 även kallad yttre ringvägen (figur 1). Området precis invid tunneln i öster heter Hyllie och har sedan bygget av Lorensborgsgatan växt enormt, med ett eget centrum och med stora byggnader. Citytunneln från Malmö mot Danmark går även genom Hyllie och området runt Lorensborgsgatan. Bygget av citytunneln skedde efter det att GCR-tunneln vid Lorensborgsgatan blivit anlagd. Grundvattennivån i området förväntas vara påverkat av en del omgivande byggnader och några större avvattningsarbeten. I området sker avsänkning med återföring vid platser öster om tunneln. Det sker även pumpning i Limhamns kalkbrott beläget väster om tunneln.



Figur 1. Området i Malmö där schaktet är beläget. Bakgrundsbild från © Lantmäteriet

I samband med tunnelns utförande gjorde Sweco ett antal undersökningar utförda av en arbetsgrupp vid Malmökontorets geologi- och grundvattenavdelning (Sweco, 2000). Arbetet omfattade utförande av sammanlagt 6 observationsrör i jord- och berglager. Ett utförande av en uttagsbrunn i berg skedde samt en provpumpning av densamma med utvärdering av provpumpningsresultaten. Modellberäkningar gjordes sedan för utplacering av uttag- och återföringsbrunnar samt en utvärdering av den planerade grundvattensänkningens inverkan på omgivande grundvattennivåer under bygg- och permanentskede.

### 1.1.2 Teoretiskt fall

Det teoretiska fallet ämnar beskriva ett fall då ett schakt behöver anläggas i genomsläppliga material. Området kan tänkas ligga på eller i anslutning till en vattentäkt eller vattenskyddsområde där vattnet är skyddat på grund av att det pumpas i syfte av dricksvattenproduktion. Det kan även finnas betydande naturvärden som kan tänkas ta skada av en grundvattensänkning. En vanlig situation är då vägar behöver byggas genom områden med betydande vattentillgångar vilket betyder att planskilda korsningar potentiellt kan hamna vid eller i anslutning till dessa.

De hydrauliska parametrarna och den geologiska lagerföljden bestäms genom att utgå från vattentäkter i Skåne med öppna akvifersförhållanden. Diskussioner har även förts med anställda på Sweco för att göra det teoretiska fallet mer realistiskt.

## 1.2 Syfte

Huvudsyftet med examensarbetet är att jämföra olika tillvägagångssätt för beräkning av inflöde av grundvatten och influensområde kopplat till schakt. Schaktets tillämpning är konstruktion av planskild korsning. Jämförelsen innefattar analytiska metoder samt två modelleringar gjorda i programvarorna SEEP/W och GMS MODFLOW. Delmålen är att:

- Beräkna inflöde och influensområde med utvalda analytiska metoder för ett fall vid Lorensborgsgatan i Malmö och ett teoretiskt fall.
- Skapa grundvattenmodeller i SEEP/W och GMS MODFLOW för att numeriskt uppskatta inflöden och influensområden.
- Jämföra resultaten av ovan nämnda uträkningar för att kunna välja ett optimalt tillvägagångssätt vid liknande beräkningssituationer.

Delmålen ska ge svar på följande frågor:

- Hur skiljer sig influensområdet åt för utvalda fall beräknat med analytiska och numeriska metoder?
- Hur skiljer sig grundvatteninflödet åt för utvalda fall beräknat med analytiska och numeriska metoder?
- Finns det en fördel att använda sig av ett numeriskt angreppssätt när det kommer till grundvattensänkning vid schaktning för planskilda korsningar och vad skulle motivera detta?

### 1.3 Avgränsning

- Examensarbetet utgår från att titta på fall där schakt skapas i syfte att konstruera planskilda korsningar.
- Det är endast permanenta grundvattensänkningar som avses. Permanenta vattentäta konstruktioner, till exempel schakt med vattentät betongbotten, tas inte med i arbetet.
- Det förväntas inte finnas några betydande tillflöden eller uttag av grundvatten i närheten av det modellerade schaktet.
- Det är endast grundvattentillrinning från schaktbotten och från schaktsidan som beaktas. Regn som faller direkt ner i öppna schakt tas inte med i beräkningarna.
- Arbetet fokuserar enbart på inflödet av vatten till schaktbotten och schaktväggar samt vilken influensradie som, på grund av avsänkningen, skapas. För de verkliga fallen bygger uträkningarna på de hydrogeologiska förhållandena i området.
- Arbetet syftar till att beskriva grundvattnets rörelse i kvartära avlagringar som kan approximeras som ett poröst medium.

## 2 Teori

### 2.1 Grundvattenbildning

Bara en liten del av jordens totala vattenvolymer finns tillgängligt för oss människor som färskvatten. Det mesta är upplåst i glaciärer och endast 0,009% finns som ytvatten i våra sjöar och vattendrag. Grundvatten står för ca 0,61% av jordens totala vattenmängd och 98% av jordens totala tillgängliga färskvatten vilket gör det till den mest betydelsefulla färskvattenkällan på vår jord (Fetter, 2014).

Den hydrologiska cykeln är en viktig komponent i bildandet av grundvatten. Den har varken början eller slut utan ses som ett kretslopp där vatten hela tiden cirkulerar. Nederbörd (P) i form av regn infiltrerar marken. Det mesta evapotranspireras (E) sedan tillbaka till atmosfären från jord och växter och kvar blir den del av vattnet som bildar grundvatten. Efter en lång period rinner grundvattnet sedan till närliggande sjöar och vattendrag. Cykeln kan förklaras med en vattenbalans enligt ekvation 1 (Gustafson, 2009).

$$P - E = R + \frac{dS}{dt} \quad \text{ekv. 1}$$

$P - E$  kallas ofta nettonederbörd vilken är balanserad av avrinning (R) och lagerförändring per tidsenhet ( $dS/dt$ ). Avrinningen innefattar här två delar, en del grundvattenavrinning och en del ytvattenavrinning där den senare inte påverkar några grundvattenreservoarer. För större områden och i ett längre tidsperspektiv blir den högra kvoten i ekvation 1 liten och kan approximeras bort vilket ger ekvation 2.

$$\bar{P} - \bar{E} = \bar{R} \quad \text{ekv. 2}$$

### 2.2 Grundvattenströmning

Hydraulisk konduktivitet är en kritiskt parameter när man utvärderar vattnets strömning genom jord och berg. En definition för hydraulisk konduktivitet är: Ett mått på hur lätt grundvatten kan flöda genom porerna i en given jordmassa. Eftersom flödet inte är definierat för en specifik vätska, brukar flödet av vatten genom porerna i en jordmassa definieras som hydraulisk konduktivitet (Powers, 2007).

Den moderna förståelsen för grundvattenflöde genom porösa medium kommer från den franska forskaren Henri Darcy född 1803. Han tog genom empiriska experiment fram en formel (ekvation 3) som beskriver vattenflöde genom porösa media. Formeln kan sägas ligga till grund för de flesta analysmetoderna inom dagens grundvattenflödesteori.

$$Q = -kA \frac{dh}{l} \quad \text{ekv. 3}$$

Där

$Q$  = Flöde ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

$A$  = Tvärsnittsarea ( $\text{m}^2$ )

$l$  = Flödeslängden mellan uppströmspunkt och nedströmspunkt (m)

$dh$  = Den totala potentialskillnaden mellan uppströmspunkt och nedströmspunkt (m)

$k$  = Hydraulisk konduktivitet (m/s)

Den totala potentialskillnaden ( $dh$ ) är skillnaden i summan av läges- och tryckpotential där läget bestämt från en godtyckligt vald referensnivå/nollnivå och där trycket är porvattentrycket uttryckt som meter vattenpelare. Den totala potentialskillnaden är viktig då den bestämmer i vilken riktning grundvattenflödet sker. Vatten flödar alltid från hög totalpotential till låg totalpotential (Cashman & Preene, 2013).

Huvudantagandet för Darcy's ekvation är att flödet måste vara laminärt, vilket är synonymt med låga flödeshastigheter. I de flesta grundvattensänkningsfall är flödet laminärt men undantag finns, bland annat för flöden i grova sediment nära pumpande uttagsbrunnar. Vidare antas flödet vara konstant och materialet vara homogent, det vill säga inneha samma elastiska egenskaper genom hela materialkroppen. Materialet antas också vara isotropt, vilket betyder att den vertikala flödeshastigheten är lika stor som den horisontella (Cashman & Preene, 2013).

Ekvation 4 visar Darcy's lag i x- y- och z-led. Materialet är isotropt om  $k_x = k_y = k_z$  (Domenico & Schwartz, 1998).

$$\begin{cases} q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{cases} \quad \text{ekv. 4}$$

### 2.2.1 Tvådimensionellt flöde

Den styrande differentialekvationen för tvådimensionellt flöde kan uttryckas enligt ekvation 5 (Geo-Slope International Limited, 2012a).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{ekv. 5}$$

Där  $\theta$  är det volymetriska vatteninnehållet och  $Q$  det applicerade flödesgränsvärdet.

Enligt differentialekvationen är skillnaden mellan flödet som går in och flödet som lämnar ett element, vid en tidpunkt, lika med magasineringsförändringen av materialet. Mer fundamentalt beskriver den att summan av flödesförändringarna i x- och y-led plus det externa flödet är lika med förändringen av det volymetriska vatteninnehållet per tidsenhet.

Under stationära förhållanden är inflödet till och utflödet ur ett element samma hela tiden. Det gör att den högra termen försvinner enligt ekvation 6 (Geo-Slope International Limited, 2012a).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad \text{ekv. 6}$$



### 2.2.2 Tredimensionellt flöde

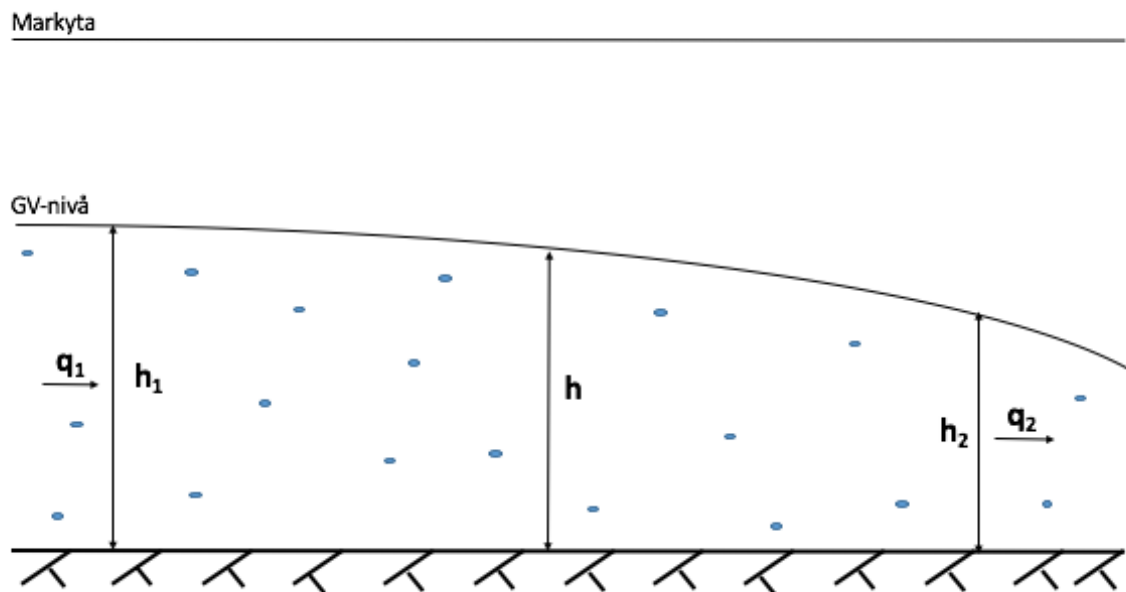
En massbalans kan skrivas med tredimensionellt flöde enligt ekvation 7 där ytterligare en dimension lagts till i z-led (Domenico & Schwartz 1998). Eftersom flödet är stationärt är den högra termen lika med noll.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad \text{ekv. 7}$$

### 2.3 Dupuits antaganden

Flödessituationen som uppstår vid öppna akviferer, då grundvattennivån också är den övre flödesgränsen beskrivs av Dupuit och hans antaganden (Fetter, 2014). Figur 2 beskriver en grundvattennivå i en öppen akvifer med en impermeabel botten. En potentialskillnad  $h_2-h_1$  kan utläsas från vänster till höger i akviferen. Om det inte finns någon tillförsel av vatten eller evaporation gäller att  $q_1=q_2$ . Enligt Darcy's lag, eftersom tvärsnittsarean är mindre vid  $h_2$  än  $h_1$ , måste den hydrauliska gradienten bli större vid  $h_2$ . Alltså är den hydrauliska gradienten i en öppen akvifer inte konstant utan ökar i flödesriktningen.

Dupuits antaganden är att den hydrauliska gradienten är lika med lutningen av grundvattennivån och att flödeslinjerna är horisontella och ekvipotentiallinjerna vertikala för små nivålutningar (Fetter, 2014).



Figur 2. Tvärsnitt av en öppen akvifer där grundvattennivån är den övre flödesgränsen. Tolkad från Fetter 2014.

## 2.4 Hydrauliska och mekaniska effekter av planskild korsning

Konsekvenserna för byggandet av en planskild korsning, där en väg byggs under en befintlig väg, är schaktning av de ytliga jord- eller bergmassorna. Den mest gynnsamma situationen är den då arbetet sker ovanför grundvattenytan, vilket skapar arbetsförhållanden utan påverkan från grundvattnet. Påverkan uppstår när det finns en grundvattenyta, belägen mellan tänkt lägstanivå för byggskede och markytan, som genererar inflöde till schaktgropen. Inflödet uppstår på grund av den potentialskillnad som skapas när porvattentrycket vid schaktsidan försvinner. Detta ger i sin tur upphov till en avsänkningsträtt vars radie omsluter det influensområde som schaktet skapar, förutsatt kontinuerlig pumpning. Pumpas ingenting från schaktet, kommer vattennivån i gropen återgå till den ursprungliga potentiometriska ytans nivå. Under permanentkedet kan lägstanivån hamna högre upp än under byggskedet. Eftersom en torr arbetsyta vill uppnås bör en grundvattenyta ligga på ~0.5 m under en tänkt lägstanivå under byggskedet (Cashman & Preene, 2013).

En konsekvens av att dränera ett område är att sättningar som kan uppstå i jordlagren. Detta påverkar endast de områden som finns inom influensradien. Jord har en skelettliknande struktur med sammankopplade korn och ett sammanbindande system av porer. Porerna kan vara mättade med vatten, antingen i slutna akviferer eller under grundvattennivån i öppna akviferer, eller omättade och då fyllda med en blandning av luft och vatten ovanför grundvattennivån. En mättad jord som utsätts för en vertikal kraft ovanför bär den kraften med hjälp av både jordskelettet och porvattnet. Trycket på en vattenmolekyl är lika stort i alla riktningar. Detta gör att man kan räkna fram effektivspänningen, vilket är den del av kraften som tas upp av jordskelettet. Ekvation 8 är framtagen av Karl Terzaghi 1920 och beskriver effektivspänning (Fossen, 2010).

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{ekv. 8}$$

Där  $\sigma'$  är effektivspänningen (Pa),  $\sigma$  är vertikal spänning från ovanliggande jordlager och eventuella vägar (Pa) och  $u$  är porvattentrycket (Pa) (Fossen, 2010). Eftersom vatten inte har någon mätbar skjuvspänning kan jordskelettet deformeras om porvattnet avlägsnas. Stabilitetsfaktorer som påverkar ett schakts väggar och botten kommer i hög grad vara beroende av porvattentrycket och markens effektivspänning (Cashman & Preene, 2013).

Dränering kan skapa konsekvenser för omkringliggande brunnar, antingen genom att uttagskapaciteten försämras eller genom att brunnarna helt sinar. Naturvärden som angränsar till en avvattning kan också komma till skada. Det kan vara våtmarker som torkar ut eller åar och sjöar där vattenståndet sjunker vilket kan skapa negativa konsekvenser för exempelvis fiskbestånd.

## 2.5 Permanent grundvattensänkning

Mål för en permanent grundvattensänkning kan vara att:

- Kontrollera grundvattennivåförändringar.
- Reducera inläckage av vatten i färdigställda strukturer, t ex tunnlar.
- Stabilisera slänter och andra markkonstruktioner.
- Skapa förutsättningar för att effektivt sanera grundvattenföroreningar.

Majoriteten av grundvattensänkingsåtgärder är temporära. Vid temporära åtgärder finns behov att sänka grundvattenytan under den period som byggverksamheten pågår och efter färdigställandet låta grundvattnet återgå till dess ursprungliga läge. Perioden som grundvattnet måste hållas undan kan vara lång, i vissa fall flera veckor eller till och med år. Definitionen för hur lång tid som avser permanent grundvattensänkning varierar men en gräns kan vara då en avsänkning planeras att kvarstå längre än 5 till 10 år, vilket då kan sägas vara permanent. Permanenta system består ofta av byggnader och väginfrastruktur (Cashman & Preene, 2013).

Permanent grundvattensänkning delas in i två kategorier, kontinuerligt pumpande och exkluderande grundvattensänkning. Den kontinuerligt pumpande avvattningen sker genom att pumpar extraherar vatten för att hålla grundvattenytan under den tänka lägstanivån för byggskedet. Konventionella pumpar kan användas men även andra typer av utloppssystem såsom dikning går att tillämpa. Ibland görs tillrinningshål i botten på schakt vilket skapar en större hydraulisk gradient mot hålet och leder vattnet dit. En pump kan sedan placeras i hålet och effektivt avvattna området (Powers 2007).

Exkluderande grundvattensänkning innefattar barriärsystem såsom spont eller betongväggar vilket helt avskärmar vattnet från att flöda in i schaktet (Powers 2007).

## 2.6 Val mellan analytisk och numerisk beräkningsmetod

Många grundvattenrelaterade problem kan, och bör, lösas med analytiska metoder. Analytiska ekvationer är, med deras antaganden i beaktning, lättare att applicera och förstå och ger pålitliga resultat om de är korrekt anpassade till rätt situation och utvärderade med gott omdöme (Powers, 2007). Den grundläggande tanken är att numeriska modeller inte nödvändigtvis är bättre eller sämre än de analytiska metoderna. Är båda bra genomförda med väldefinierade konceptuella modeller som beskriver geologi och hydrauliska förutsättningar, kan inflöden och influensområden uppskattas med båda alternativen (Cashman & Preene, 2013).

Följande hydrauliska och geologiska förutsättningar gör en numerisk lösning mer fördelaktig än en analytisk (Powers, 2007):

**Stratifierade akviferer:** Ibland blir vissa akviferstyper eller geometrier för komplicerade för de analytiska metoderna att använda. Antingen blir ekvationerna för svåra att använda eller så blir deras grundläggande antaganden källa till alldeles för stora fel. Exempel på svårigheter kan vara om akviferen är stratifierad, det vill säga om det finns flera olika geologiska enheter inom akviferen. Exempelvis är en tvådimensionell modell bra när det finns en stor rumslig skillnad i transmissivitet i ett slutet akvifersystem.

**Anisotropi och vertikala flöden:** Problem kan också uppstå då anisotropa förhållanden råder och det finns vertikala grundvattenflöden. Analytiska modeller är baserade på Dupuits antagande om att flödet i en akvifer endast sker horisontellt (se avsnitt 2.3). För att undkomma Dupuits antagande kan en numerisk tredimensionell modell användas då den både tar de vertikala och horisontella flödena i beaktande.

**Oregelbundna gränser:** Finns det randvillkor som behöver beaktas kan analytiska beräkningar ge missvisande resultat. Exempel på randvillkor kan vara sjöar, floder och andra vattendrag som antingen har en tillrinning mot eller avrinning från grundvattnet, det vill säga beroende på vattendragets topografiska läge samt vattenstånd bidrar de till eller avger de grundvatten. Hydrauliska barriärer, som exempelvis vattendelare och fysiska barriärer, som horstar eller berg i dagen, kan lättare tolkas av numeriska modeller.

**Dynamiska lösningar:** De numeriska lösningarna har fördelen att kunna räkna på framtida scenarion med hjälp av dynamiska (tidsberoende) modeller. Modellerna kan ge en bild av framtida driftscenarion där nederbörd och uttagsflöden varierar. Därmed kan man skapa optimala driftscenarion där framtida dricksvattenbehov blir tillgodosedda samtidigt som miljökonsekvenser som skador på naturvärden kan förutspås och minimeras.

**Delvis penetrerande brunnar/schaktväggar:** Delvis penetrerande brunnar eller schaktväggar resulterar i en avvikelse från de radiella flödesmönster som uppstår då en brunn helt penetrerar akviferen. En 3D-modell eller en tvärsnittmodell i 2D kan behövas för att förklara både de horisontella och de vertikala flödeskomponenterna vid en delvis penetrerad akvifer.

### 3 Analytiska metoder

En första uppskattning som bör göras vid en grundvattensänkning är överslagsberäkningar med analytiska ekvationer. Beräkningarna kan antingen stå för sig själva och tillräckligt beskriva flödessituationen för att ett infrastrukturprojekt ska fortsätta eller användas som kontrollberäkningar som visar om framtagna numeriska beräkningar ligger inom rimliga gränser. Kvalitén på resultaten är starkt kopplade till kvalitén och kvantiteten på indata. Matematiska modeller bygger på antaganden vilka kan generera felaktiga slutsatser om ekvationerna anpassas till fel situation. Om indata har en stor osäkerhet från början kommer en modell, oavsett hur välanpassad och välformulerad den är, att spegla det och ha en inbyggd osäkerhet i resultaten.

Analytiska beräkningar för radiellt flöde till brunnar är baserade på antaganden och förenklingar gjorda av Dupuit. Följande antaganden gäller för nedanstående ekvationer utöver de tidigare angivna (se avsnitt 2.3) (Cashman och Preene, 2013).

- Akviferen är öppen.
- Akviferen har en impermeabel botten.
- Akviferen har horisontell utbredning med enhetlig mäktighet i alla riktningar utan mellanliggande infiltration eller barriärgränser inom influensområdet.
- Darcy's lag är giltig i hela akviferen.
- Den omättade zonen har ingen inverkan/påverkan på avsänkningen.
- Grundvattnet flödar horisontellt mot schaktväggen.
- Vatten kommer direkt från magasinet då grundvattennivån sänks.

För att skapa jämförelser mellan de analytiska och numeriska modellerna har ekvationer valts ut som ska spegla inflödet samt influensområdet som skapas på grund av avsänkning vid schaktarbete.

#### 3.1 Thiems brunnsekvation

För beräkning av grundvatteninflöde till en brunn under öppna akviferförhållanden finns många olika matematiska ekvationer att välja mellan. Ekvationen som idag kallas Thiems brunnsekvation (Thiem, 1906) bygger mycket på Dupuit och hans arbeten vilket gjort att ekvationen även går under namnet Thiem-Dupuit (Tügel et al., 2016). Följande antaganden behövs för Thiems brunnsekvation, utöver de generella antagandena givna ovan (Fetter, 2014).

- Inflöde sker med konstant hastighet.
- Jämvikt har uppnåtts, det vill säga det sker ingen mer avsänkning per tidsenhet.

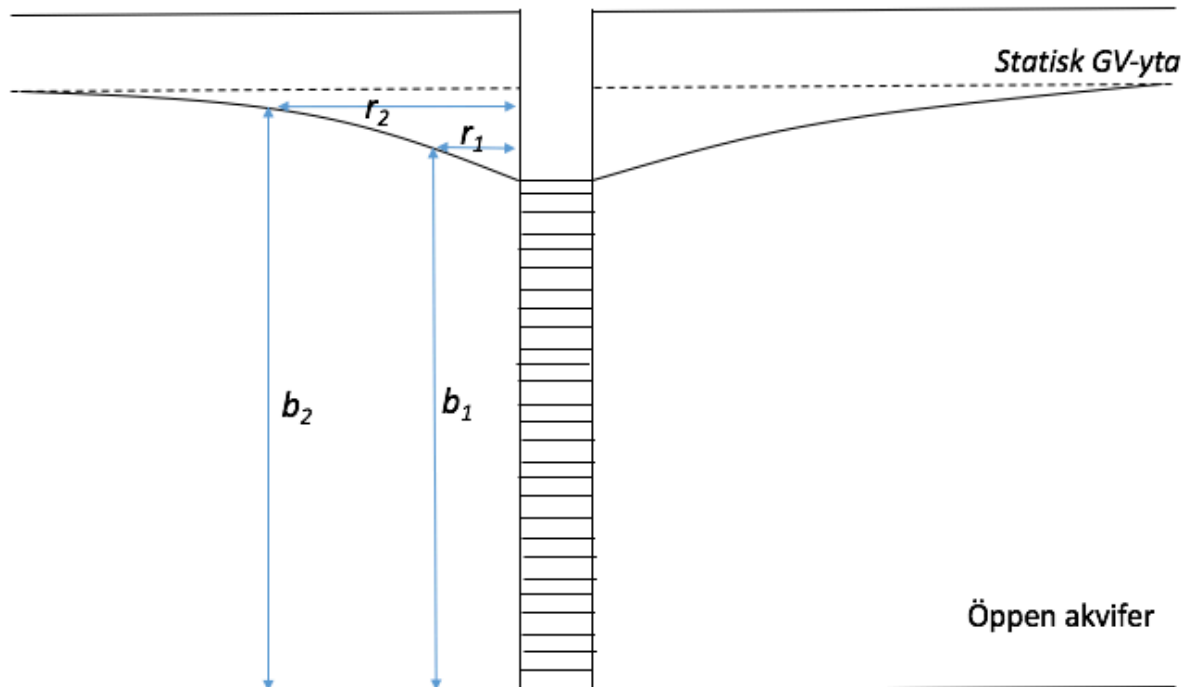
Stationärt radiellt flöde i en öppen akvifer beskrivs av Thiem enligt ekvation 9 med tillhörande beskrivning i figur 3.

$$b_2^2 - b_1^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{ekv. 9}$$

För fallet när en planskild korsning ska anläggas krävs uppskattade värden på både inflöde och influensområde. Två okända variabler och en ekvation kräver ytterligare en ekvation alternativt erfarenhetsmässiga uppskattningar för någon av variablerna. Den yttre radien  $r_2$  (influensradien) finns inne i en logaritmisk term i ekvation 9 och ger, då godtyckligt uppskattad, upphov till små förändringar i inflöde ( $Q$ ). Detta gäller förutsatt en godtycklig influensradie inom intervallet  $30\text{ m} < r_2 < 5000\text{ m}$ . Förändras däremot  $Q$  i ekvation 9 ger små skillnader upphov till stora variationer i  $r_2$  vilket kan göra ett godtyckligt  $Q$  svårt att uppskatta (Cashman och Preene, 2013).

I verkligheten kommer troligtvis flera av de ovan nämnda antagandena inte vara uppfyllda. Exempelvis är verkliga jordavlagringar sällan helt homogena. Flödet kan heller inte alltid antas vara horisontellt, framförallt inte nära brunnen där en stor vertikal flödeskomponent ofta uppstår. En ekvivalent brunnsradie  $r_1$  måste också ansättas vilken kan vara svårtolkad när det är fråga om ett öppet schakt och inte en pumpbrunn.

Influensområdet för radiell strömning antar en cirkulär områdesgräns kring avsänkningsen. Detta är ett teoretiskt koncept vilken är en förenkling av den komplexa påverkansgräns som skapas beroende på akviferens utseende. Det mest trovärdiga tillvägagångssättet att bestämma  $r_2$  på är genom att utföra ett pumpptest och tolka resultaten med tid-avsänkingsdata enligt Cooper-Jakob eller liknande (Fetter, 2014). Det finns många beprövade metoder för att utvärdera pumptester men ekvationerna presenterade nedan fokuserar på fallet då ingen propumpningsdata finns tillgänglig.



Figur 3. Grundvattensänkning för en pumpbrunn i en öppen akvifer. Tolkad från Fetter (2014).

## 3.2 Beräkning av inläckage och influensområde

### 3.2.1 Influensområde

Beräkning av influensområde ( $r_2$ ) har beskrivits på många sätt i litteraturen. Nedan antas  $r_2$  beräknas med ekvation 10 vilken är en empirisk formel för radiellt flöde hämtad från Cashman och Preene (2013) och kallas Sichardts ekvation. Eftersom resonemanget från föregående sida antas hålla där ett grovt uppskattat  $r_2$  inte bör ge stor inverkan på grundvatteninflödet har det i detta arbete valts att endast utgå från ekvation 10 för beräkning av influensområdet.

$$r_2 = 3000(b_2 - b_1)\sqrt{k} \quad \text{ekv. 10}$$

Dupuit antog att brunnens radie var liten i förhållande till det influensområde som skapas. För beräkning av influensområdet när brunnsradien är större än det uträknade influensområdet måste ekvation 11 användas vilken är en modifierad version av ekvation 10 där brunnsradien adderas till influensradien.

$$r_2 = r_1 + 3000(b_2 - b_1)\sqrt{k} \quad \text{ekv. 11}$$

Den ekvivalenta brunnsradien beräknas med ekvation 12.

$$r_1 = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{ekv. 12}$$

Där  $A$  = arean för schaktet. För fallet när ett linjärt flöde sker måste Sichardts ekvation användas med en annan kalibreringsfaktor vilket ger upphov till ekvation 13.

$$r_2 = 1750(b_2 - b_1)\sqrt{k} \quad \text{ekv. 13}$$

### 3.2.2 Inläckage

Inläckage av grundvatten till öppna schakt har man försökt beskriva på många olika sätt och i litteraturen finns många metoder att välja mellan. Anledningen till att ekvationerna nedan har valts är att de är vanligt förekommande i infrastrukturprojekt där avvattning sker för olika typer av ändamål, bland annat för planskilda korsningar. Flera ekvationer är baserade på Thiems brunnsekvation där omskrivningar av ekvationerna har gjorts för att anpassa dem till olika flödessituationer som förväntas uppstå vid grundvatteninflöde till schakt samt påverkan från vissa områdesspecifika förutsättningar. Beräkningar med dessa ekvationer ska ses som ett första steg i en iterativ lösningsprocess där den slutliga lösningen beror på problemet i fråga och vilka krav som ställs. Följande beteckningar återfinns i ekvationerna.

$Q$  = Grundvatteninflöde ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $k$  = Hydraulisk konduktivitet ( $\text{m/s}$ )  
 $b_2 - b_1 = s$  = Avsänkning (m)  
 $r_1$  = Ekvivalent brunnradie (m)  
 $r_2$  = Influensradie (m)  
 $s$  = Avsänkning (m)  
 $A$  = Cirkulär area av schakt ( $\text{m}^2$ )  
 $T$  = Transmissivitet ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $W$  = Infiltration till grundvattnet ( $\text{m/s}$ )

### 3.2.2.1 Thiem

Thiems brunnsekvation som diskuteras ovan beräknar ett radiellt stationärt horisontellt inflöde till en pumpande brunn i en öppen akvifer. Ekvation 14 är en omskrivning av ekvation 9.

$$Q = \frac{b_2^2 - b_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \pi k \quad \text{ekv. 14}$$

### 3.2.2.2 Cashman och Preene

Cashman och Preene (2013) presenterar en ekvation för beräkning av inflöde till schakt baserat på ett linjärt inflöde till ett delvis penetrerande schakt i en öppen akvifer (ekvation 15).

$$Q = (0.73 + 0.23 \left(\frac{s}{b_2}\right)) \frac{k r_0 (b_2^2 - b_1^2)}{r_2} \quad \text{ekv. 15}$$

Där  $s$  = avsänkning i schaktet. Egentligen definieras parametern som penetrationsdjup för schaktbotten under ursprunglig grundvattenyta vilket är lika med avsänkning eftersom schaktbotten är ansatt som lägsta avsänkning.  $r_0$  = längden på schaktet utan cirkelomvandling. Notera att inget logaritmiskt uttryck finns här vilket beror på att flödet sker linjärt mot schaktet.

### 3.2.2.3 Vandersluis

Vandersluis et al. (1995) presenterar ett uppskattat inflöde till öppna dagbrott i ekvation 16 nedan. Inflödet är baserat på Dupuits antaganden beskrivna ovan samt att brunnradien är stor. Metoden har använts vid många öppna dagbrottsprojekt och har visat bra resultat för grundvatteninflöde jämfört med uppmätta värden (Vandersluis et al, 1995). Metoden har framförallt visat sig fungera vid torra klimat där nederbörden är begränsad varvid anpassningen till svenska förhållanden kan ifrågasättas.

$$Q = \frac{1.366k(2b_2 - s)s}{\log(r_2 + r_1) - \log(r_1)} \quad \text{ekv. 16}$$

### 3.2.2.4 Marinelli och Niccoli

Marinelli och Niccolis (2000) beräkningsmetoder för inläckande grundvatten baseras också på Thiem och Dupuits antaganden men här är schaktet uppdelat mellan två zoner, en övre zon med ett inflöde från schaktväggen samt en undre zon med vatten flödande från schaktbotten. Inget grundvattenutbyte antas ske mellan dessa zoner. Ekvation 17 beräknar inflödet genom schaktväggen medan ekvation 18 beräknar det grundvatten som förväntas läcka in i schaktet



underifrån under stationära förhållanden. Ekvation 19 summerar flödena till ett totalt inläckage (Marinelli & Niccoli, 2000).

$$Q_1 = W\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad \text{ekv. 17}$$

$$Q_2 = 4r_1kb_2 \quad \text{ekv. 18}$$

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 \quad \text{ekv. 19}$$

Återigen är  $r_1$  = radien från mitten av schaktet till schaktväggen då schaktets area räknats om till en cirkel (ekvation 12).

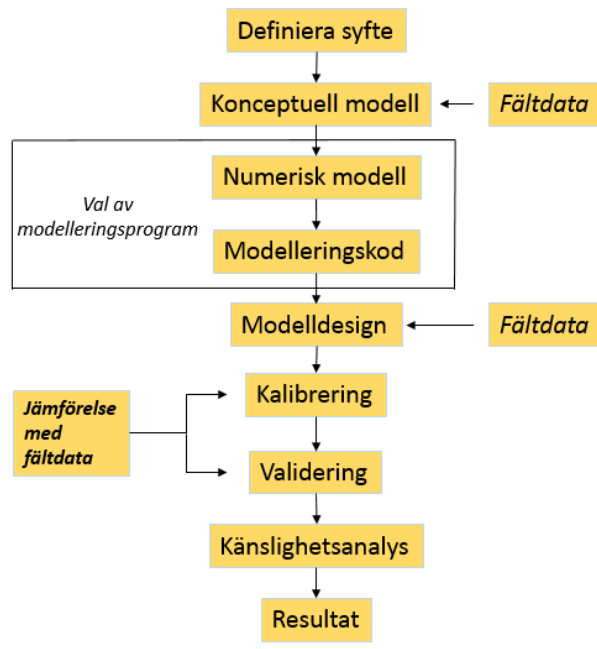
#### 3.2.2.5 SBEF

Svenska byggnadsentreprenörsföreningen (SBEF) har tagit fram en förenklad ekvation för att uppskatta inflödet till schakt (SBEF, 2009). Skriften har utarbetats av Statens geotekniska institut (SGI). Ekvation 20 nedan visar på en grovt förenklad variant av Thiem-Dupuits öppna brunnsekvation.

$$Q = 1000ks^2 \quad \text{ekv. 20}$$

## 4 Numeriska metoder

### 4.1 Metod



Figur 4 . Metodsteg vid framtagning av en numerisk modell. Bilden är tolkad från Andersson & Woessner (1992).

För att skapa en väl fungerande modell krävs att man utför den principiella stegprocessen enligt figur 4. Först och främst måste ett behov och ett syfte finnas eller skapas. Att göra en numerisk modell kräver en relativt stor insats och den insatsen måste vara rättfärdigad innan modellarbetet drar igång. Ett numeriskt angreppssätt bör exempelvis inte användas när ett analytiskt finns att tillgå som kan producera godtagbara resultat. I syftet ska modellens omfattning framgå (Andersson & Woessner, 1992).

När ett behov av en modell är fastställt och syftet är definierat ska en konceptuell modell tas fram. Den konceptuella modellen måste bygga på arkivmaterial i form av tidigare undersökningar och rådata. Om arkivmaterialet inte är omfattande bör kompletterande egna mätningar och fältstudier göras. Detta är ett viktigt steg som till stor del lägger grunden för resterande modellsteg.

För att utföra själva beräkningarna krävs en modelleringskod. Koden innehåller en algoritm som beskriver den konceptuella modellen numeriskt. Koden behöver vara korrekt vald för att passa den konceptuella modellen samt vara trovärdig och helst verifierad och flitigt använd av tidigare utförda beräkningsfall av liknande slag (Andersson & Woessner, 1992). För att förverkliga den konceptuella modellen används sedan ett datorprogram i vilket den valda modelleringskoden används. Datorprogrammen i den här rapporten har valts till GMS och SEEP/W. I dessa två program kan själva modelldesignen utformas. Det betyder att all känd data

från den konceptuella modellen matas in och formar modellen. Alla akvifersparametrar och deras lägen tillsammans med randvillkor, begynnelsevillkor och andra in- och utflöden till/från akviferen såsom vattenuttag ur brunnar och grundvattennybildning anges och skapar en modell som är anpassad för att köras i det valda modelleringsprogrammet (Powers, 2007).

När modellen gjorts om från konceptuell till numerisk ska en kalibrering genomföras. Kalibrering av en modell innebär en förändring av parametervärden så att en rimlig matchning fås mellan modellens uträknade värden och uppmätta värden från undersökningar gjorda i fält, oftast av uppmätta grundvattennivåer. Värden som förändras kan vara nybildning, hydraulisk konduktivitet och pumpade uttagsmängder och ändringarna görs iterativt eller automatiskt med en parameteruppskattningskod, såsom PEST (Aquaveo, 2017).

När modellen är färdigkalibrerad ska en validering göras. Den går ut på att öka tillförlitligheten till modellen genom att använda de kalibrerade parametervärdena med andra in- och utflöden för att återskapa en ny flödessituation som ska stämma överens med en ny uppsättning fältobservationer av, i vanligaste fallet, grundvattennivåer (Andersson & Woessner, 1992).

Slutligen bör en modell utsättas för en parameter- eller känslighetsanalys. En kalibrerad modell utför efterföljande prediktiva simuleringar med en viss grad av förtroende. Därför är en analys av de ingående parametrarna bra för att undersöka modellens känslighet för förändring, dess robusthet. Utifrån den konceptuella modellen bestäms realistiska intervall för viktiga modellparametrar mot vilka modellen körs varvid en uppskattning kan göras huruvida parametern är mer eller mindre känslig och om mer vikt behöver läggas vid framtagningen av värden på den valda parametern (Powers, 2007).

#### 4.2 Stationär & dynamisk modell

Det finns två fundamentala sätt att analysera inläckage, stationärt och dynamiskt. En stationär inläckagemodell beskriver en analys där grundvattennivåer och flödeshastigheter inte förändras med tiden. Eftersom tidsaspekten är ignorerad för en stationär modell blir ekvationerna något förenklade. Den dynamiska modellen, å andra sidan, har potentialskillnader som förändras med tiden vilket försvårar ekvationerna men ger samtidigt mer noggranna resultat och en möjlighet till djupare förståelse av det hydrogeologiska systemet. Detta kräver mer information gällande tidsberoende data såsom nederbörd och uttagsvolym över den tid modellen är tänkt att simulera (Broaddus, 2015).

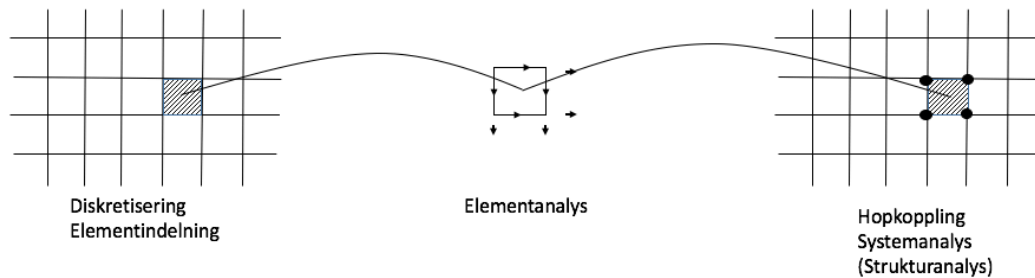
#### 4.3 Finita Element- och Finita Differensmetoden

Finita elementmetoden (FEM) används av många modelleringsprogram som syftar till att beskriva grundvattenflöde i flera dimensioner. Bakgrunden till metoden skissades redan under 1800-talet och har utvecklats dramatiskt genom tillgången på stora datorer under 1950- och 60-talet.

FEM går till så att den struktur som skall analyseras delas in i små ändliga element eller finita element. Baserat på strukturens egenskaper beräknas sedan för varje element sambandet mellan de krafter och deformationer som verkar i elementhörnen, noderna. Alla element kopplas därefter ihop. Differentialekvationer används för att beskriva kraftjämvikter och

deformationssamband som kan beräknas för varje nod i linjära ekvationssystem med flera tusen obekanta variabler (Wiberg, 1981).

FEM-analysen utförs i tre steg (figur 5). Först görs en elementindelning där konstruktionen indelas i ett antal element som var för sig är enklare att analysera. Därefter analyseras elementen i en elementanalys, varefter samtliga element kopplas samman genom randvillkor till ett system i en systemanalys eller strukturanalys.



Figur 5. FEM-analysens process. Problemet delas in i element vilka blir analyserade var för sig och sedan hopkopplade till en strukturanalys.

Systematiken att beräkna en konstruktion genom uppdelning i element har visat sig mycket lämplig vid lösningen av 2D- och 3D-problem. Även om metoden i många fall genererar fina resultat utan att stöta på svårigheter är inte alla problem lösta. Beräkning med FEM och bedömning av resultatens rimlighet kräver stor kunskap inom det specifika ämnet som beräkningarna är gjorda för. Man måste hela tiden ha i åtanke att FEM är en approximativ metod. För att göra rätt bedömning måste man veta vilka approximationer som är gjorda och vad de kan ha för betydelse för hela problemlösningen (Wiberg, 1981).

Ett alternativt lösningssätt då grundvattenflöden ska approximeras i modelleringsyfte är med finita differensmetoden (FDM). Den räknar fram en trycknivå i noden vilket också blir medelvärdet för hela cellens trycknivå. Medan finita elementmetoden definierar skillnaden i trycknivå mellan celler genom interpolation, gör finita differensmetoden inga antaganden mellan uträknade värden från en nod till nästa. Finita differensmetoden är generellt sätt lättare att förstå och programmera och färre ingångsparametrar behövs för att skapa ett rutnät. Finita element är däremot bättre på att uppskatta oregelbundna randvillkor och hur de kan placeras och förflyttas (Andersson & Woessner, 1992)

#### 4.4 SEEP/W

SEEP/W är ett tvådimensionellt FEM modelleringsprogram som är utvecklat av Geo-Slope (Geo-slope International Limited, 2012b). Programmet ingår i en serie modelleringsprogram kallat Geo-Studio där tanken är att programmen ska kunna kopplas till varandra. Exempel på andra program är SLOPE/W och SIGMA/W. Exempelvis kan resultaten tas från ett läckageproblem uträknat i SEEP/W och användas för släntstabilitetsberäkningar i SLOPE/W eller deformationsberäkningar i SIGMA/W och på så sätt öka förståelsen för geotekniska problem.

SEEP/W analyserar grundvattenläckage och porvattentryckets spridning inom porösa material.

Programmet kan både simulera den mättade och omättade zonen och kan köras både stationärt och dynamiskt. Typiska användningsområden för SEEP/W är undersökning av förändringar i porvattentryck vid skapandet av jorddammar, avsänkning vid pumpning ur uttagsbrunnar och läckageinflöden av grundvatten vid schakt.

En modell kan ritas upp direkt i programfönstret eller importeras som en extern fil. Randvillkor och materialegenskaper kan sedan grafiskt anges till modellen. Materialegenskaper kan uppskattas genom att ange kornstorlek, hydraulisk konduktivitet samt mättad volymetrisk vattenmängd. En ursprunglig grundvattenyta måste också anges.

När programmet löst flödesanalysen kan resultaten visas genom konturlinjer som visar grundvattennivåer eller x-y plottar för beräknade parametrar såsom trycknivå, hastighet och konduktivitet. Flödeslinjer kan läggas in där man tror att ett utflöde uppstår och på så sätt uppskatta hur mycket vatten som kan läcka in genom en öppen schaktvägg.

De olinjära finita elementekvationerna hanteras genom en iterativ lösningsprocess. Med grafiska verktyg kan man följa lösningarna och få en överblick över konvergeringsprocessen (Geo-slope International Limited, 2012b).

#### 4.5 GMS MODFLOW

GMS står för Groundwater Modeling System och är ett mjukvarusystem utvecklat av företaget Aquaveo (Groundwater Modeling System, 2010). GMS använder bland annat MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988), som är en tredimensionell FDM modelleringskod, utvecklat av USGS (United States Geological Survey). MODFLOW är idag det mest testade och använda grundvattenmodelleringsprogrammet i världen och kan appliceras på en mängd olika grundvattenrelaterade problem såsom grundvattentillförsel, sanering, föroreningsspredning samt grundvattensänkning vid infrastrukturprojekt (Powers, 2007).

MODFLOW använder sig av blockcentrerade rutnät och kan simulera öppna, slutna och läckande akviferer. Programmet fungerar endast för flöden i den mättade zonen där konstant temperatur och densitet är antaget. Flerfasflöden och flöden i den omättade zonen samt akviferer med varierande anisotropi kan inte simuleras (Fetter, 2014).

Akvifersegenskaper såsom vertikal och horisontell hydraulisk konduktivitet, magasin-koefficient och effektiv porositet definieras för varje cell för att simulera naturliga variationer i akviferen. Olika ingångsparametrar kan bli mer eller mindre nödvändiga beroende på den specifika flödessituationen som ska lösas. Modellens in- och utflöden såsom grundvattenuttag, åar, sjöar och infiltration av regn skapar randvillkor som tas i beaktning. MODFLOW hanterar specifika randvillkor med hjälp av paket som anropas när ett specifikt randvillkor måste lösas. Det finns många paket inom MODFLOW med namn som drain (dike), recharge (grundvattennybildning) och wells (brunnar) (Powers 2007).

Modellens resultat består av cellspecifik distribution av grundvattennivåer och grundvattenflöden inom akviferen. Modellens totala inflöden och utflöden kan granskas i en flödesbalans där varje in- och utflöde listas och jämförs. I flödebalansen visas även modellens numeriska noggrannhet.

## 5 Konceptuella modeller

En konceptuell modell i grundvattensammanhang är en illustrerad representation av grundvattenssystemet. Den görs ofta som ett blockdiagram eller genom att skapa tvärsnitt av den tänka modelleringsplatsen och dess omgivning. Utformningen av den konceptuella modellen bestämmer dimensionerna för den matematiska modellen samt hur eventuella rutnät ska designas.

Den främsta anledningen för att skapa den konceptuella modellen är för att förenkla och organisera den ofta svårtolkade och ibland svåråtkomliga fältdata som behövs för att en komplett bild av flödessystemet ska kunna ges (Andersson och Woessner, 1992).

Följande frågor bör en konceptuell modell kunna svara på (Powers, 2007):

- Är akviferen öppen eller sluten?
- Behövs en stationär eller dynamisk modell?
- Kommer brunnsfiltret penetrera hela akviferens mäktighet?
- Vad finns för antagna värden på viktiga parametrar såsom hydraulisk konduktivitet, transmissivitet, mäktighet, magasincoeffcient och anisotropi?
- Hur trovärdiga är ovan nämna parametrar och hur har de tagits fram?
- Hur infiltreras akviferen?
- Finns andra läckagekällor annat än uttagsbrunnar för området?

Ju mer den konceptuella modellen efterliknar verkligheten desto bättre kommer den numeriska modellen att bli. Det finns dock en avvägning där modellens enkelhet ställs mot verklig anpassning. Modellen bör vara så förenklad som möjligt samtidigt som den ska behålla tillräcklig komplexitet för att reproducera grundvattenssystemets förhållanden. Det är viktigt att den konceptuella modellen blir en giltig representation för de mest betydelsefulla hydrogeologiska processerna i systemet. Fel i numeriska modeller kan ofta härledas tillbaka till bristfälliga konceptuella modeller (Andersson och Woessner, 1992).

### 5.1 Lorensborgsgatan

Information för den konceptuella modellen för projektet vid Lorensborgsgatan är framförallt hämtat från en provpumpning av uttagsbrunnen UB1 gjord av Sweco (dåvarande VBB VIAK) år 2000 (Sweco, 2000). Information har även hämtats från SGUs kartor för jordartsutbredning samt berggrund för området i sydvästra Malmö. En diskussion har även först med anställda vid Swecos kontor i Malmö som har erfarenhet av geologin i området.

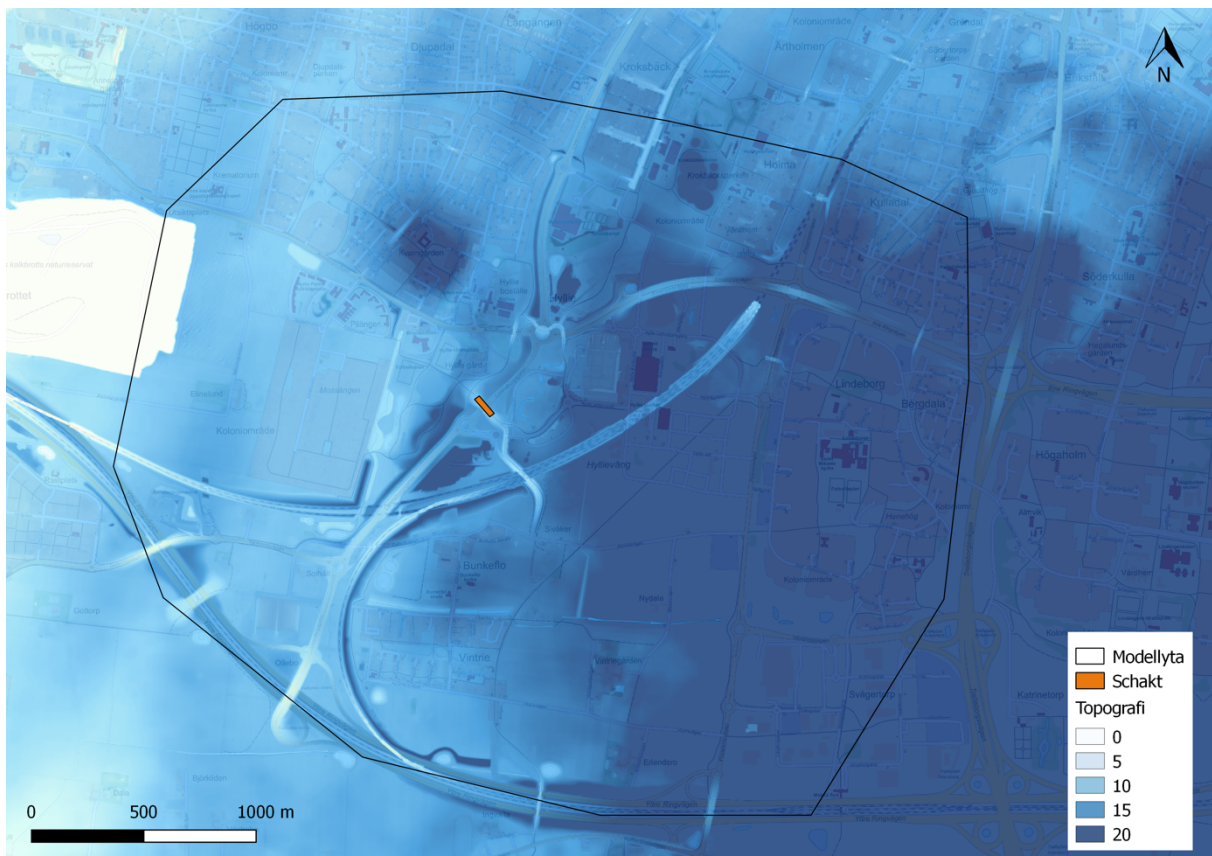
Lorensborgsgatan är en stadsgata som sträcker sig i N-S riktning i de sydvästra delarna av Malmö. I samband med en förlängning av gatan planerades en ny bro att byggas med en gång, cykel- och ridtunnel (GCR) under. Vid grundläggningen av brofundamenten utfördes schaktning från nuvarande marknivå på ca +16 m ner till en nivå på ca +8 m. En pumpstation med schaktbotten på +7.5 m byggdes samtidigt. Brofundament samt pumpstationen befann sig under den dåvarande grundvattennivån i området. För att konstruktionen av dessa skulle vara

genomförbar behövdes en grundvattensänkning, detta för att skapa tillräcklig länshållning på byggplatsen under utförandeskedet (Sweco, 2000).

### 5.1.1 Områdesgräns och topografi

Området för GRC-tunneln vid Lorensborgsgatan ligger i sydvästra Malmö precis invid den yttre ringleden (väg E22). Väster om tunneln, på ca 1,5 km avstånd, ligger Limhamns kalkbrott där industriell brytning av kalk skedde fram till 1994. Botten av kalkbrottet ligger 65 m under markytan. Vatten pumpas kontinuerligt ur brottet med ett genomsnittligt pumpflöde på 70 l/s (0,07 m<sup>3</sup>/s). Utan avsänkningen från pumpningen skulle en 55 meter djup sjö bildats i brottet (Malmö Stad Gatukontoret, 2010). Modellgränsen sträcker sig fram till kalkbrottets början ca 1,5 km västerut. Den östra gränsen är placerad på samma avstånd fast åt motsatt håll från kalkbrottet. De norra och södra gränserna är ansatta genom interpolation av uppskattade grundvattentrycknivåer (tydligare förklarar i avsnitt 5.1.6 Randvillkor).

Topografin för området är hämtad som en rasterfil från Lantmäteriet med 2 meter upplösning och visas i figur 6 tillsammans med schaktets läge. Området präglas av ett relativt platt landskap där en höjdskillnad kan urskiljas i öst-västligt riktning.



Figur 6. Områdesgräns med schaktets läge i mitten och topografi för området .Bakgrundsbild från © Lantmäteriet.

### 5.1.2 Berggrund

I stora delar av Malmö utgörs berggrunden av kalksten. Kalkstenen i området kallas för Danienkalksten vilken har en mäktighet som uppgår till ca 60 m. Enligt Swecos resultat från undersökningsborringar gjorda i anslutning till det planerade tunnelläget vid

Lorensborgsgatan har en lokalt tunnare mäktighet på 20-50 m uppskattats (Sweco, 2000). Danienkalkstenen överlagrar ett äldre lager kalksten vilken har en mäktighet på ca 500 till 700 m. Den yngre kalkstenen i området innehåller mycket sprickor vilka kan förklaras genom glaciologiska processer såsom inlandsisens fram- och tillbakadragande (Fossen, 2010). Ca 500 m väster om undersökningsområdet finns indikationer på en större förkastningslinje i berggrunden, den så kallade Vellingeförkastningen. Förkastningslinjen har en utsträckning i NNV-SSO riktning (Sweco, 2000).

Provpumpningen som utfördes av Sweco gjordes av en bergborrad brunn (UB1) och gav värden på transmissivitet (T) och läckagekoefficient ( $k'/b'$ ). Läckagekoefficienten har enheten  $s^{-1}$  där  $k'$  motsvarar den vertikala hydrauliska konduktiviteten för det tätande lagret och  $b'$  motsvarar mäktigheten på detta lager. En utvärdering av tids-avsänkingsförloppet enligt Cooper-Jacobs metod gav en transmissivitet på  $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  och en läckagekoefficient på  $1,1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ . Hydraulisk konduktivitet fås genom division med akviferens mäktighet (Fetter, 2014). I fallet med det vattenförande kalkberget, med varierande tjocklek mellan 20-60 m, ger detta en hydraulisk konduktivitet mellan  $6,5 \times 10^{-5} - 2,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ . Den vertikala konduktiviteten för kalkberg är enligt Domenico och Schwartz (1998) i storleksordningarna  $5 \times 10^{-11} - 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ . Berggrundens antagna konduktivitet presenteras i tabell 1.

### 5.1.3 Jordlager

Berggrunden överlagras av kvartära avlagringar. Avlagringarna utgörs framförallt av isälvsavlagringar och moränlera som bildats under de istider som området utsatts för. Moränlera har vanligtvis en relativt låg hydraulisk konduktivitet i storleksordningen  $10^{-11} - 10^{-8} \text{ m/s}$  (Fetter, 2014). I delar av modelleringsområdet återfinns postglacial sand och grus (Sweco, 2000). Välsorterad sand och grus ger enligt Fetter (2014) en hydraulisk konduktivitet i storleksordningen  $10^{-5} - 10^{-3} \text{ m/s}$ .

Läckagekoefficienten uträknad från provpumpning gjord av Sweco ger en indikation på genomsläppligheten i vertikalled för de två gemensamma jordlagren. Multipliceras läckagekoefficienten med det tätande lagrets mäktighet blir produkten en vertikal konduktivitet. Den vertikala konduktiviteten ger en uppfattning om hur genomsläppliga de övre moränlagrena är i vertikalled. Mäktigheten på moränlagren varierar mellan 8 och 12 meter och ger då en vertikal konduktivitet på  $8,8 \times 10^{-9} - 1,3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ .

En diskussion har förts med anställda på Swecokontoret i Malmö varvid det framkommit information angående områdets kvartära lagerföljd. Enligt Swecos databaser framgår det att kalkberget i sydvästra Malmö är överlagrat med ett tätare lager morän, exempelvis lerig morän eller moränlera, med en varierande mäktighet på 2-4 m. I det tätande lagret ska även mindre sandlinser finnas placerade i direkt kontakt med det konduktiva kalkberget. Ovanpå det tätande lagret återfinns sedan ett mer genomsläppligt moränlager med inslag av silt och sand. Eftersom området domineras av moräner med vertikala skillnader i silt- och sandinnehåll kommer de hydrauliska konduktiviteterna vara relativt låga med värden som liknar det för moränlera. Jordlagrens antagna konduktivitet presenteras i tabell 1.



Tabell 1. Typisk lagerföljd för området kring Lorensborgsgatan med förklaringar och hydrauliska konduktiviteter i vertikal- och horisontalled.

Lager	Förklaring	Kh (m/s)	Kv (m/s)
Översta – Sandig morän	Baserat på storleksordningar hämtade från Fetter samt uppskattning från läckagekoefficient tagen från provpumpning (Sweco 2000).	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,09 \times 10^{-8}$
Mellan - Moränlera	Baserat på storleksordningar hämtade från Fetter samt uppskattning från läckagekoefficient tagen från provpumpning (Sweco 2000).	$1,00 \times 10^{-8}$	$1,09 \times 10^{-8}$
Undre - Kalkberg	Värden för vattenförande kalkberg baseras framförallt på transmissivitet framtagen från provpumpning samt den geologiska beskrivningen (Sweco 2000).	$4,35 \times 10^{-5}$	$5,00 \times 10^{-10}$

#### 5.1.4 Utbyte mellan jord och berg

Under provpumpningen (Sweco, 2000) visade det sig att grundvattennivån i de övre delarna av jordlagren i stora drag sjunker lika snabbt och lika mycket som i kalkberget. Detta indikerar att jordlagren i området har en god hydraulisk kontakt med kalkberget. Några negativa hydrauliska gränser hade ej noterats utifrån avsänkingsförloppet vilket talar för att det aktuella kalklagret utgör en större sammanhängande akvifer. Tydliga reaktioner av provpumpningen skedde i alla observationsrör, såväl berg- som jordborrade.

#### 5.1.5 Grundvatten och infiltration

Grundvattennivån i området är uppmätt till +12,5 m (RH70) i uttagsbrunnen UB1. På ett avstånd av ca 500 m norr om pumpplatsen finns ett observationsrör i berg där regelbundna mätningar gjorts under ett år. I brunnen hade en mediannivå på ca +13,6 (RH70) med en variation på +0,5 m och -0,8 m uppmäts. Med hänsyn till ovanstående kan en grundvattennivå i det aktuella området antas till +12,9 (RH70) och  $\pm 0,7$  m. Den västra sidan i området, belägen mot Limhamns kalkbrott, förväntas ha en drastiskt avsänkt grundvattenyta vilket beror på den grundvattensänkning som sker i kalkbrottet (Sweco, 2000).

Modellens övre lager antas vara relativt genomsläppligt och nederbörd som faller över området antas infiltrera och nybilda grundvatten. Enligt SMHI (2015) är nederbörden i området 600 mm/år. Med en årlig avdunstning på 400 mm/år ger det en avrinning på 200 mm/år. Nybildningen i området antas vara konstant över tiden. Området förväntas ha ytavrinning i form av bäckar samt en del mindre uppehållsdammar vilka minskar grundvattennybildningen.

#### 5.1.6 Randvillkor

Randvillkoren för Lorensborgsområdet är presenterade i tabell 2 och figur 7. Eftersom kalkbrottet ligger så pass nära tunneln skapas ett påverkansområde med en tillrinning av grundvatten mot kalkbrottet. Topografen (figur 6) visar på en grundvattenströmning som är riktad mot kalkbrottet. En västlig områdesgräns (A1) är ansatt vilken följer kalkbrottets östliga rand. Den är belägen på ett avstånd på ca 1,3 km från schaktet och representeras av en specificerad grundvattenpotential som har getts värdet för den lägre grundvattentytan 12,2 m. Modellgränser bör sättas så att området som ska studeras blir centrerat i modellen, detta för att

med större marginal undvika påverkan av yttre randvillkor som är ansatta med större osäkerhet (Andersson och Woessner, 1992). Eftersom det var svårt att hitta några fysiska eller hydrauliska barriärer i området förutom kalkbrottet ansattes den östliga gränsen 1,3 km från schaktet i motsatt riktning till kalkbrottet (A2). A2 ansattes med en specificerad grundvattenpotential med värdet för den högsta grundvattennivån i området.

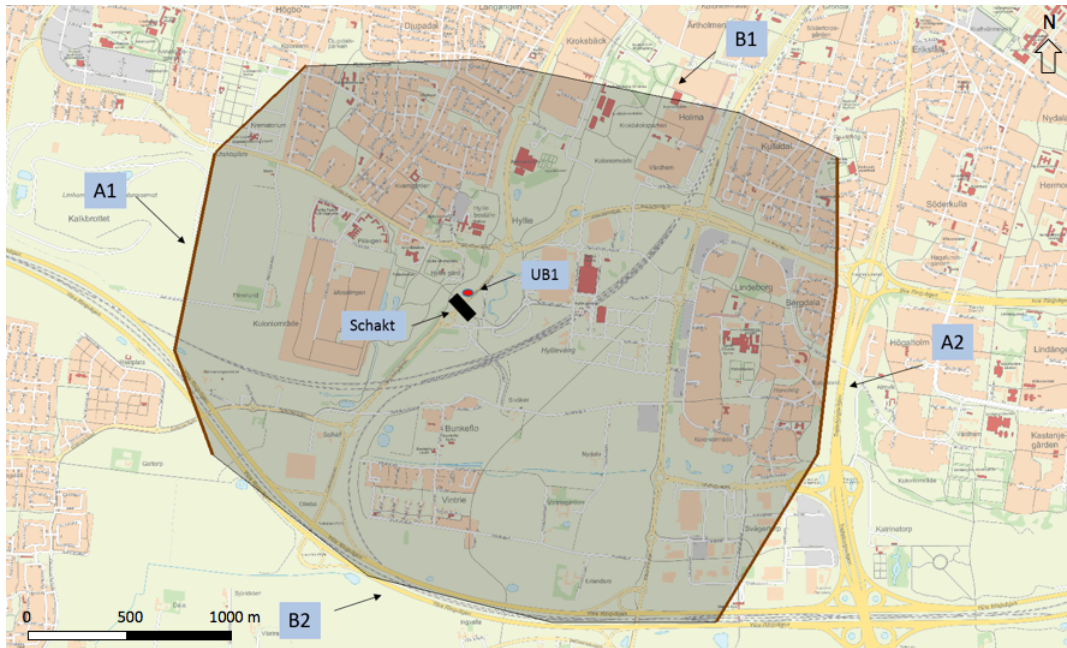
De trycknivåer som utgör konturlinjer för grundvattennivåer kallas ekvipotentiallinjer (Domenico & Schwartz, 1998). På ett godtyckligt avstånd från det studerade området gjordes en modellgräns genom att dra en rät linje mellan vad som uppskattats som intelligande ekvipotentiallinjer. Detta skapade nollflödesgränser i norr (B1) och söder (B2). Att vattnet inte flödar över gränsen bygger på flödesnätprincipen (Fetter, 2014) där flödeslinjerna antas gå i rät vinkel mot ekvipotentiallinjerna och att grundvattnet då flödar parallellt med modellgränserna B1 och B2. Flödesnätprincipen bygger på flera antaganden, bland annat att marken är homogen och isotrop. Dessa kommer med största sannolikhet inte vara uppfyllda vid hela nollflödesgränsernas längd och gränserna är därför ansatta med ett godtyckligt avstånd från tunneln på ca 1 km i avseende att inte ha en alltför stor inverkan på modelleringsresultaten.

I mitten av modellen, vid platsen för tunneln, är ett schakt utplacerat. Schaktet har en storlek på 100x20 m och ett djup på 8.5 m under markytan (Sweco 2000). Schaktet är modellerat som en dränering, där vatten leds bort. Schaktväggarna är vertikala medan väggarna i verkligheten troligtvis uppvisar ett sluttande utseende.

Uttagsbrunnen UB1 är även satt som ett randvillkor. Den har ett uttag på 311 m<sup>3</sup>/d. Uttagsbrunnen användes i kalibreringssyfte.

Tabell 2. Randvillkor för Lorensborgsgatan med förklaringar.

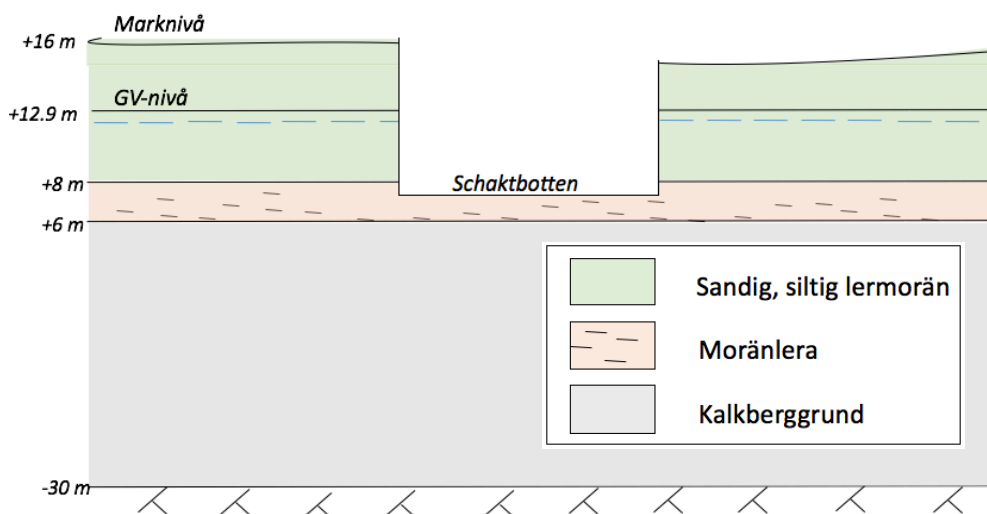
Namn på randvillkor	Typ av randvillkor	Värde av randvillkor	Förklaring till val av randvillkor
Norra gränsen - nollflöde (B1)	No flow boundary	Inget	Gränsen är satt vinkelrät mot ekvipotentiallinjerna.
Västra gränsen – konstant tryck (A1)	Constant head boundary	12,2 m	Gränsen beskriver det vattentryck som förväntas finnas vid VNV sidan av modellen.
Östra gränsen – konstant tryck (A2)	Constant head boundary	13,6 m	Gränsen beskriver det vattentryck som förväntas finnas vid ÖSÖ delen av modellen.
Södra gränsen – nollflöde (B2)	No flow boundary	Inget	Gränsen är satt vinkelrät mot ekvipotentiallinjerna
Uttagsbrunn – UB1	Well	311 m <sup>3</sup> /d	Uttagsbrunn använd vid propumpningen. Randvillkor som användes vid kalibreringen.
Nederbörd	Recharge	0.0005 m/d	Regn som förväntas infiltrera och bilda grundvatten över modellytan.
Schakt	Drain	+7,5 m (botten av schakt, RH70)	Schaktet i mitten av modellen är ansatt som ett dike där vatten förväntas lämna modellen.



Figur 7. Områdesgräns med yttre randvillkor samt schaktets läge och läget för uttagsbrunnen UB1.

#### 5.1.7 Tvärsnitt

Ett tvärsnitt för den konceptuella modellen är presenterad i figur 8 nedan. Tvärsnittet är förenklat och beskriver de tre huvudsakliga lagerna som finns i området baserat på den ovan presenterade informationen. Mäktigheterna är uppskattade och förväntas variera över modellytan. Det översta lagret består av en sandig, siltig lermorän. Moränen återfinns både i SGU's jordartskarta och i Sweco's arkiverade material i GeoAtlas. Likaså finns det mindre genomsläppliga materialet med moränlera presenterat i jordartskartan. Med hjälp av tolkning från anställda med erfarenhet från områdets geologi placerades lagret med moränlera som ett tätande lager under den sandiga lermoränen. Det vattenförande kalkberget sträcker sig sedan ner till ett antaget impermeabelt kalkberg.



Figur 8. Schematiskt tvärsnitt för Lorensbergsgatan där de geologiska lagrens mäktigheter och schaktet visas.

## 5.2 Teoretiskt fall

Den konceptuella modellen för det teoretiska fallet är baserad på realistisk information hämtad från olika undersökningar gjorda av Sweco och SGU samt från litteraturen. Det tänka scenariot innefattar konstruktionen av en planskild korsning som angränsar till en vattentäkt. Problem uppstår ofta vid dessa typer av områden på grund av att mycket vattenförande material förekommer. En risk finns också att en permanent avsänkning kan påverka vattentäktens funktion.

### 5.2.1 Områdesgräns och topografi

Området är begränsat i östlig och västlig riktning av konstanta flödesgränser. I norr och söder förväntas grundvatten flöda parallellt med modellgränsen och gränserna ansätts därför till nollflöden. Modellens storlek uppgår till ca 10 km<sup>2</sup>. I området förväntas inga större höjdskillnader förekomma.

### 5.2.2 Randvillkor

Randvillkor är ansatta enligt föregående exempel där förändringar av randvillkorsvärden är gjorda enligt tabell 3. Ingen brunn finns att tillgå för det teoretiska exemplet så därför är den borttagen. Ett tänkt schakt är placerat i mitten av modellen med ett djup på 10 meter och en längd och bredd som uppgår till 10x20 meter.

Tabell 3. Randvillkor för det teoretiska fallet med förklaringar.

Namn på randvillkor	Typ av randvillkor	Värde av randvillkor	Förklaring till val av randvillkor
Norra gränsen - nollflöde (B1)	No flow boundary	Inget	Gränsen är satt vinkelrät mot ekvipotentiallinjerna.
Västra gränsen – konstant tryck (A1)	Constant head boundary	12,2 m	Gränsen beskriver det vattentryck som förväntas finnas vid VNV sidan av modellen.
Östra gränsen – konstant tryck (A2)	Constant head boundary	13,6 m	Gränsen beskriver det vattentryck som förväntas finnas vid ÖSÖ delen av modellen.
Södra gränsen – nollflöde (B2)	No flow boundary	Inget	Gränsen är satt vinkelrät mot ekvipotentiallinjerna
Nederbörd	Recharge	0.0008 m/d	Regn som förväntas infiltrera och bilda grundvatten över modellytan.
Schakt	Drain	+6 m (botten av schakt, RH70)	Schaktet i mitten av modellen är ansatt som ett dike där vatten förväntas lämna modellen.

### 5.2.3 Jordlager

Jordlagren i området antas vara välsorterade isälvsavlagringar bestående av sand och grus samt siltig sand. Dessa utgör den huvudsakliga akviferen i området. Det översta lagret utgör isälvsavlagringar varav mäktigheten uppgår till 16 m. En hydraulisk konduktivitet har valts enligt tabulerade värden för välsorterad sand och grus till  $1 \times 10^{-4}$  m/s (Fetter, 2014). Ovanliggande berggrunden finns ett 20 meter mäktigt sandigt siltlager. Vatten förväntas

strömma även här och en hydraulisk konduktivitet är satt till  $1 \times 10^{-5}$  (Fetter, 2014). Den vertikala konduktiviteten är satt till en tredjedel av den horisontella.

#### 5.2.4 Berggrund

Berggrunden i området antas vara granitisk ortognejs vilken förväntas vara en geologisk enhet med liten förmåga att lagra och transportera grundvatten och mäktigheten är därför satt till 10 meter. Den hydrauliska konduktiviteten för berggrunden är satt till  $1 \times 10^{-9}$  m/s (Domenico och Schwartz, 1998). En sammanfattning över de hydrauliska konduktiviteterna finns i tabell 4. Den vertikala konduktiviteten är satt till en tredjedel av den horisontella.

Tabell 4. Lagerföljd med förklaringar och hydraulisk konduktivitet i vertikal- och horisontalled.

Lager	Förklaring	$K_h$ (m/s)	$K_v$ (m/s)
Översta – Isälvsavlagring	Baserat på storleksordningar hämtade från Fetter (Fetter 2014).	$1,0 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
Mellan – Sandig silt	Baserat på storleksordningar hämtade från Fetter (Fetter 2014)	$1,0 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$
Undre - Ortognejs	Värden för impermeabel ortognejs baseras på tabulerade värden (Domenico och Schwartz 1998).	$1,0 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-10}$

#### 5.2.5 Utbyte mellan jord och berg

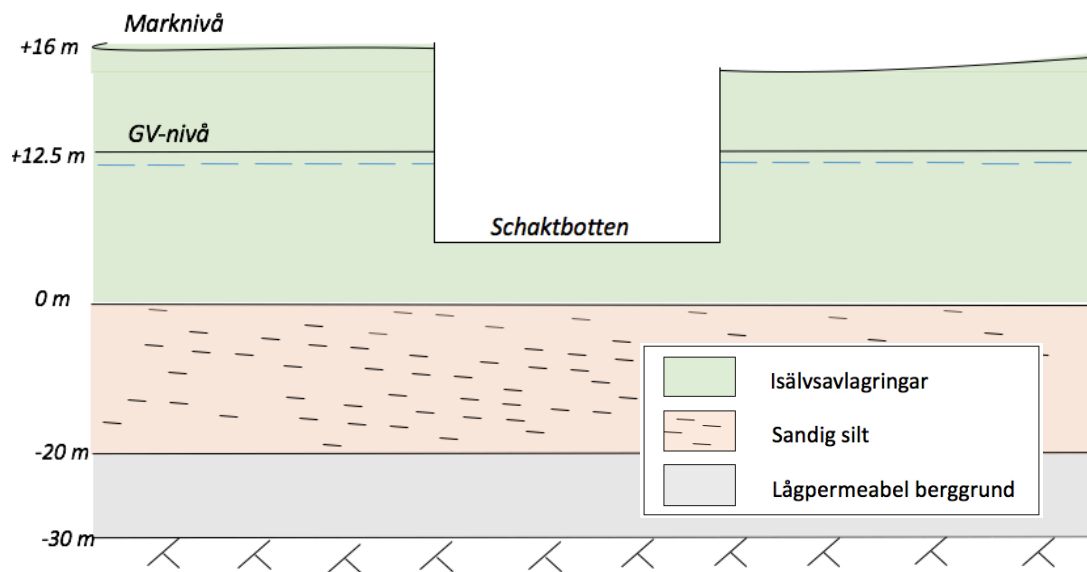
Mycket lite utbyte förväntas ske mellan jord och berg. Bergets överyta kan ses som ett tätande lager.

#### 5.2.6 Grundvatten och infiltration

Inga uppmätta grundvattennivåer finns att utgå ifrån och grundvattenpotentialerna är därför ansatta godtyckligt. Grundvattennivån är satt till 12,5 meter. Området nybildar grundvatten genom nederbörd. Eftersom de övre lagren av området består av genomsläppliga material förväntas hela nederbördsvolymen infiltrera området. Området är tänkt att ligga i Skåneregionen varvid nederbördsdata för Skåne har använts. Årsnederbörden för Skånes inland är uppskattat till 800 mm/år. Med en årlig avdunstning på 400 mm/år ger det en potentiell grundvattenbildning på 400 mm/år.

#### 5.2.7 Tvärsnittsyta

Figur 9 visar ett schematiskt tvärsnitt över det teoretiska fallet där de geologiska enheterna och deras mäktigheter presenteras.



Figur 9. Schematiskt tvärsnitt över det teoretiska fallet med de geologiska lagrens mäktigheter och schaktet.

## 6 Analytiska beräkningar

För att beräkna inflöde och influensområde med analytiska ekvationer används värden på olika egenskaper och parametrar från de konceptuella modellerna. För att jämföra resultaten av uträkningarna från både de analytiska beräkningarna och de numeriska beräkningarna, används samma ursprungliga indata. Problemet angrips med en iterativ lösningsprocess, där problemet först och främst försöker lösas med de mest enkla metoderna (analytiska) och där man går vidare i processen (till numeriska) först då de enkla metoderna uppenbart bevisats bristfälliga eller olämpliga. Det förväntas därför inte finnas några modelleringsresultat tillgängliga. En känslighetsanalys har genomförts där de utvalda analytiska metodernas känslighet för förändringar av den horisontella hydrauliska konduktiviteten utvärderats.

### 6.1 Beräkning av inflöde och influensområde

Influensområdet för Lorensborgsgatan samt det teoretiska fallet har endast beräknats med hjälp av Sichards ekvation där en ekvivalent radie tagits fram. För att beräkna inläckaget har fem olika ekvationer använts vilka är presenterade i kapitel 3. De ingående parametrarna som använts till respektive ekvation är presenterade i tabell 5. Parametervärdena som använts för varje analyserat fall är presenterade i tabell 6.

Tabell 5. Använda parametrar för vardera metod.

Parameter	Beteckning	Theim	Cashman och Preene	Vandersluis	Marinelli och Niccoli	SBEF	Sichardt
Hydraulisk konduktivitet	k	x	x	X	x	x	x
GV-höjd vid r <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	x	x	X		x	x
GV-höjd vid r <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	x	x	X	x	x	x
Ekvivalent brunnradie	r <sub>1</sub>	x	x	X	x		
Influensradie	r <sub>2</sub>	x	x	X	x		
Total avsänkning	s		x	x			
Infiltration	W				x		

Tabell 6. Parametrar och deras värden använda i de analytiska ekvationerna.

Parameter	Beteckning	Enhet	Lorensborgsgatan	Teoretiskt fall
Hydraulisk konduktivitet	k	m/s	1,00E-07	1,00E-04
GV-höjd vid r <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	m	1,5	26
GV-höjd vid r <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	m	6,9	32,5
Ekvivalent brunnradie	r <sub>1</sub>	m	25,2	7,9
Influensradie	r <sub>2</sub>	m	Från Sichards ekvation	Från Sichards ekvation
Total avsänkning	s	m	5,4	6,5
Cirkulär area av schakt	A	m <sup>2</sup>	2000	200
Infiltration	W	m/s	6,30E-09	9,50E-09

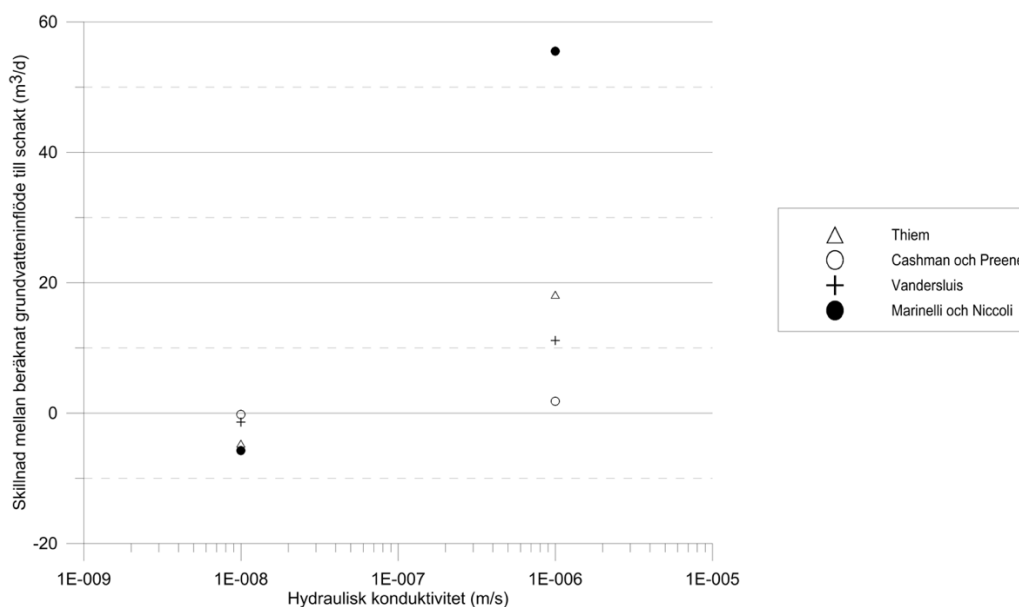
## 6.2 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys är genomförd för att studera ekvationernas känslighet vid parameterförändringar. Eftersom den horisontella hydrauliska konduktiviteten anses vara en känslig parameter för ekvationerna är det endast den som undersöks. Endast fallet Lorensborgsgatan har använts för känslighetsanalysen och konduktiviteten förändrades enligt scenarion presenterade i tabell 7.

Tabell 7. Scenariobeskrivning för känslighetsanalysen.

Parameter	Enhet	Ursprungligt värde	Ökat värde	Minskat värde
Hydraulisk konduktivitet	m/s	1,00E-07	1,00E-06	1,00E-08

Resultaten för känslighetsanalysen är presenterade i figur 10 nedan där förändrat inflödet beräknats och plottats för varje ekvation och scenario. Värden för SBEF är borttagna på grund av att värdenas storlek försvårade avläsningen i grafen. Som kan utläsas ur grafen ökar samtliga ekvationers beräknade inflöden vid en ökning av konduktiviteten. En minskning av inflöde för samtliga ekvationer sker också då konduktiviteten minskas. Variationerna mellan de ökade och minskade konduktiviteterna är väldigt små för Cashman och Preene. Det kan bero på att ekvationen antar ett linjärt flöde och saknar därför ett logaritmiskt uttryck vilket medför att den beräknade influensradien får en större betydelse. Det kan också bero på att Cashman och Preenes ekvation bara tar med den delen av schaktet som befinner sig under grundvattenytan medan resterande ekvationen räknar med fullt penetrerande schakt. Marinelli och Niccoli skapar de största utslagen mellan beräknade värden för respektive scenario. För det minskade värdet skapas en relativt liten förändring men för ökningen kan en markant skillnad jämfört med resterande värden ses. En förklaring kan vara att ekvationen tar hänsyn till inflöde från två zoner och behöver därför ha den hydrauliska konduktiviteten med i två ekvationer som sedan summeras. Det kan göra att konduktiviteten är känsligare för Marinelli och Niccolis beräkning.



Figur 10. Graf som beskriver inflödets förändring vid förändrade konduktivitetsvärden för vardera metod. Värden för SBEF är borttagna.



## 7 Numeriska beräkningar i SEEP/W

Grundvattenmodeller har blivit konstruerade i programmet SEEP/W för att kunna jämföra ett tvådimensionellt angreppssätt vid beräkning av inläckage och influensområde. En modell för vardera fall är presenterade i detta kapitel.

### 7.1 Lorensborgsgatan

Den tvådimensionella modellen för Lorensborgsgatan har blivit konstruerad utifrån den konceptuella modellen från kapitel 6. Ingen validering är genomförd för modellen på grund av begränsande valideringsdata och brist på lösningssätt gällande programvara. Följande steg har blivit utförda och presenteras nedan:

- Modelluppbyggnad av en stationär grundvattenmodell i SEEP/W.
- Kalibrering av den stationära grundvattenmodellen.
- Genomförd känslighetsanalys för grundvattenmodellen med en kort diskussion.

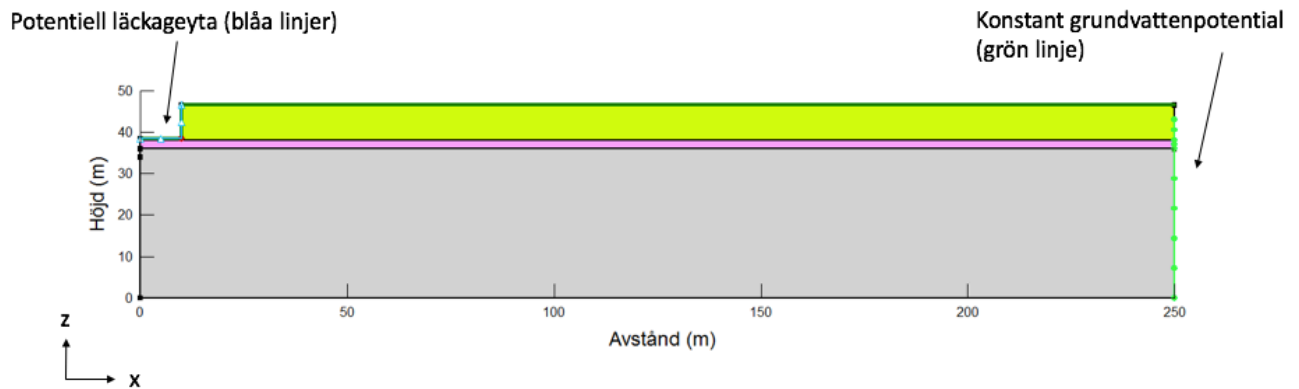
#### 7.1.1 Modelluppbyggnad

##### 7.1.1.1 Geometri

Lösningsprocessen i SEEP/W börjar genom att rita upp området under ett definitionsstadium vilket kan liknas vid att översätta den konceptuella modellen till programvaran. Modellen ritas upp i z-led enligt den totalhöjd som ges i tvärsnittet på kap 6. Längden i x-led är satt till 250 meter. Hela modellområdet är speglat, vilket innebär att hela modellområdet blir 500 meter. Avståndet anses vara tillräckligt stort för att modellkanten inte ska påverka modelleringsresultaten samt skapar ett område som innesluter de flesta observationsbrunnar. Figur 11 beskriver geometrin.

##### 7.1.1.2 Randvillkor

Eftersom modellen är i två dimensioner definieras de yttre randvillkoren av fyra modellsidor där höger sida är ansatt med ett konstant grundvattenpotential med en höjd som motsvarar medelgrundvattennivån i området på 12.5 meter (RH70) vilket motsvarar en höjd på 42.5 meter i modellen. Vänster sida utgör schaktgropen vilken har blivit modellerad som en potentiell läckageyta med ett ursprungsflöde satt till noll. Eftersom botten på schaktet ska vara helt dränerat placeras ett nolltryck i en punkt i bottenkanten av schaktet. Botten av modellen är en nollflödesgräns. Figur 11 visar modelluppbyggnaden där lagerföljden är uppdelad i gult, rosa och grått. Schaktets utformning visas till vänster där den potentiella läckageytan är utsatt som blåa linjer. Till vänster återfinns den konstanta grundvattenpotentialen utsatt som en grön linje.



Figur 11. Modelluppbyggnad med schakt till vänster med en potentiell läckageyta och en konstant grundvattenpotential till höger.

#### 7.1.1.3 Rutnät

Finite elementrutnätet i SEEP/W-modellen är uppbyggt av kvadrater och trianglar. Cellstorleken i modellen är satt till en meter och anpassas till randvillkoren. Kvadratiske randvillkor och modellgränser skapar ett kvadratisk rutnät medan triangulära celler kan uppstå vid brutna modellgränser. Rutnätets höjd är 46 meter och längden är 250 meter.

#### 7.1.1.4 Lagerföljd och grundvattennybildning

Lagerföljden i modellen är uppbyggd så att de geologiska enheterna placeras på rätt höjd baserat på deras mäktighet. De hydrauliska egenskaperna bestäms genom att definiera varje material för sig. Materialen kan antingen definieras som mättade-omättade, vilket innebär att materialet kan ha kontakt med den omättade zonen, helt mättade, vilket innebär att ingen kontakt finns med den omättade zonen eller som ett gränsskikt vilket fungerar som ett tätande lager. För Lorensborgsmodellen har alla lager definierats som mättade-omättade vilket rekommenderas enligt SEEP/W-manualen (Geo-slope International Limited, 2012a) när materialens definition inte tydligt kan bestämmas. Vidare bestäms materialens egenskaper genom att först bestämma en volymetrisk vattenmängdsfunktion (WC-funktion). SEEP/W bestämmer denna funktion själv genom att man definierar antingen kornstorlekar enligt en siktanalys eller bestämmer jordtyp enligt ett jordprov. Den mättade vattenmängden ska sedan definieras tillsammans med en koefficient för volymkomprimerbarhet (enhet 1/kPa). Materialen för Lorensborgsmodellen har angivits med jordtyper enligt den konceptuella modellen med en mättad vattenmängd på  $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  och en volymkomprimerbarhet på  $0.0005 /\text{kPa}$  vilket är förinställt i SEEP/W.

När WC-funktionen är bestämd görs en hydraulisk konduktivitetsfunktion baserat på WC-funktionen. En uppskattningsmetod väljs tillsammans med WC-funktionen och en mättad hydraulisk konduktivitet i x-led. Som uppskattningsmetod väljs Van Genuchten och WC-funktionen väljs till den redan definierade för materialet. Hydraulisk konduktivitet ansätts enligt den konceptuella modellen.

I modellen nybildas grundvatten i form av nederbörd som infiltrerar akviferen. Det finns även ett konstant vattentryck från sidan av modellen som representerar den nederbörd som faller utanför modellområdet.

### 7.1.2 Kalibrering

Eftersom grundvattenytan i SEEP/W bestäms i förväg, antingen genom fasta tryck från sidorna eller genom en utsatt grundvattenyta i dynamiska simuleringar, går det inte att kalibrera modellen mot ursprungliga grundvattenytor. Kalibreringen i SEEP/W är i stället gjord med provpumpningen utförd av Sweco (Sweco, 2000). Kalibreringen av modellen var problematisk eftersom programmet inte är utformat för att simulera provpumpningar i öppna akviferer. För simuleringen av pumpningen användes fyra observationsbrunnar vilka presenteras i tabell 17 och figur 39 i Appendix. Brunnarna är utvalda på grund av deras placering i förhållande till UB1 och är markerade i figur 12.

#### 7.1.2.1 Modelluppbyggnad

För att återskapa ett pumptest och kalibrera SEEP/W-modellen behövde den modifieras samtidigt som ett antal nya randvillkor ansattes. Modellen byggdes upp i definitionsstadiet enligt ett scenario utan schakt med ett konstant vattentryck placerat vertikalt längs med den högra sidan av modellen på ett avstånd i x-led som motsvarar gränsen för modellens influensområde. En pump, med inflöde i kalkberget, simulerades med en vertikal utflödesgräns utmed den vänstra sidan av modellen. För att kunna efterlikna en pumpande brunn kan SEEP/W köras axisymmetriskt, vilket innebär att hela modellen antas rotera runt x-axelns nollpunkt. Eftersom modellen nu antas rotera runt nollpunkten måste den vertikala utflödesgränsen (den vänstra gränsen) förskjutas i positivt x-led med radien för pumpbrunnen. Följande parametrar användes utöver de presenterade i den konceptuella modellen:

$$Q = 0.0036 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$r_{\text{brunn}} = 0.1 \text{ m}$$

Eftersom det sker en liten påverkan från provpumpningen på observationsbrunnarna längst bort ifrån UB1 sätts avsänkningen, alltså avståndet i x-led för den konstanta vertikala trycklinjen, till 250 meter. Pumpbrunnen var initialt slitsad de två översta metrarna i kalkberget men efter konvergensproblem ökades slitsen till de översta 35 metrarna av kalkberget.

#### 7.1.2.2 Kalibreringsresultat

Förändringarna i konduktivitet för den manuella kalibreringen visas i tabell 8.

Tabell 8. Konduktivitetsförändringar efter kalibrering av SEEP/W modellen.

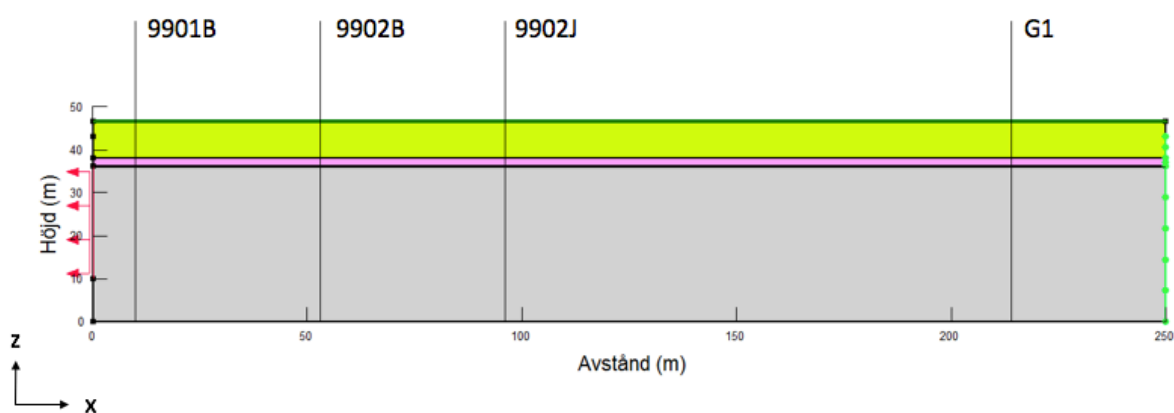
Lager	Ursprunglig horisontell konduktivitet (m/s)	Ursprunglig vertikal konduktivitet (m/s)	Förändrad horisontell konduktivitet (m/s)	Förändrad vertikal konduktivitet (m/s)
Top	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,09 \times 10^{-8}$	$5,00 \times 10^{-7}$	$1,67 \times 10^{-7}$
Mitten	$1,00 \times 10^{-8}$	$1,09 \times 10^{-8}$	$5,00 \times 10^{-8}$	$1,67 \times 10^{-8}$
Botten	$4,35 \times 10^{-5}$	$5,00 \times 10^{-10}$	$4,35 \times 10^{-5}$	$4,35 \times 10^{-5}$

Tabell 9 visar uppmätt avsänkning och beräknad avsänkning i observationsbrunnarna samt de residualer som kvarstår efter kalibreringen. För att få en bra överensstämmelse med observerade grundvattennivåer förändrades modellens föreskrivna grundvattenpotential, det vill säga den högra tryckgränsen, från det ursprungliga värdet 12,9 m till 12,5 m.

Tabell 9. Observerade brunnar med avstånd från pumpbrunnen samt deras uppmätta residualer.

Brunn	Akvifer	Avstånd från pumpbrunn (m)	Uppmätt avsänkning (m)	Modellerad avsänkning (m)	Residualer
9901B	Berg	10	1,49	1,22	0,27
9902B	Berg	53	0,94	0,59	0,35
9902J	Jord	96	0,91	0,36	0,55
G1	Jord	214	0,62	0,06	0,56

Figur 12 visar modellens kalibreringsuppbyggnad. Observationsbrunnarnas lägen är utplacerade på deras respektive avstånd från uttagsbrunnen. Randvillkoret för uttagsbrunnen är utmarkerat med röda pilar.



Figur 12. Modellsuppbyggnad i SEEP/W för kalibreringen med observationsbrunnarnas lägen utplacerade. Röda pilar markerar randvillkoret för uttagsbrunnen.

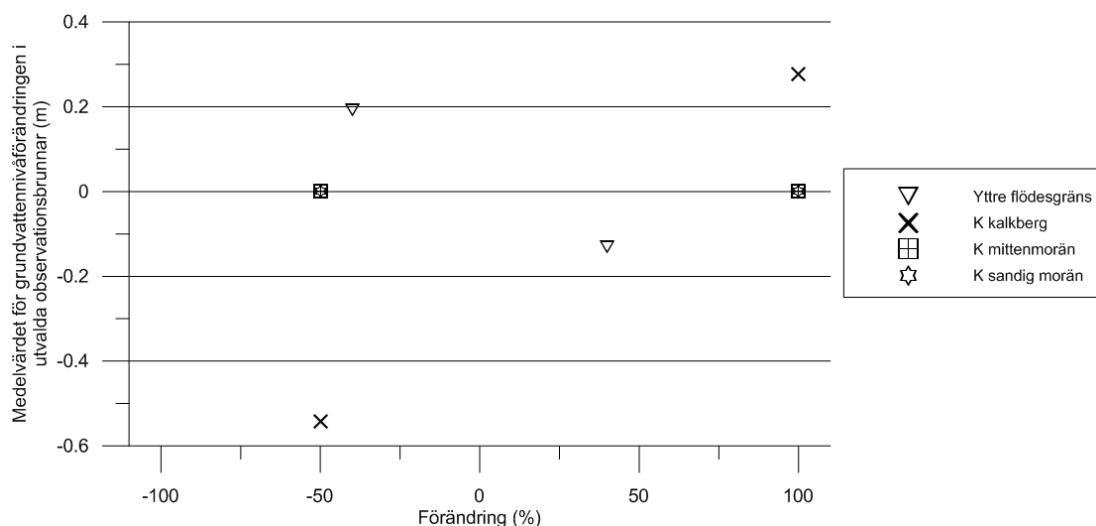
### 7.1.3 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen gjordes med uppsättningen för pumptestet, presenterat i kalibreringsdelen, där en parameter skiftas i taget. Därefter registreras förändringen i uppmätt grundvattennivå för observationsbrunnarna.

Två grafer presenteras nedan där grafen i figur 13 visar medelvärdet för grundvattennivåförändringen i utvalda observationsbrunnar för procentuella parameterförändringar. De parametrar som skiftas procentuellt är de horisontella konduktiviteterna för varje geologiskt lager samt avståndet från uttagsbrunnen för den yttre flödesgränsen. Figur 14 visar medelvärdet för grundvattennivåförändringen i utvalda observationsbrunnar för parameterförändringar baserade på avstånd i meter. De förändrade parametrarna består av mäktigheterna för de geologiska lagren samt höjden på den yttre flödesgränsen, det vill säga den statiska grundvattenytan. Medelvärdet av förändringen för de fyra observationsbrunnarna från kalibreringen användes för att registrera hur modellen svarar på ändrade parametervärden. Eftersom modellen fortfarande kördes axisymmetriskt ansågs observationsbrunnarnas avstånd från pumpbrunnen vara en viktig faktor för att hela modellområdet skulle bli representerat.

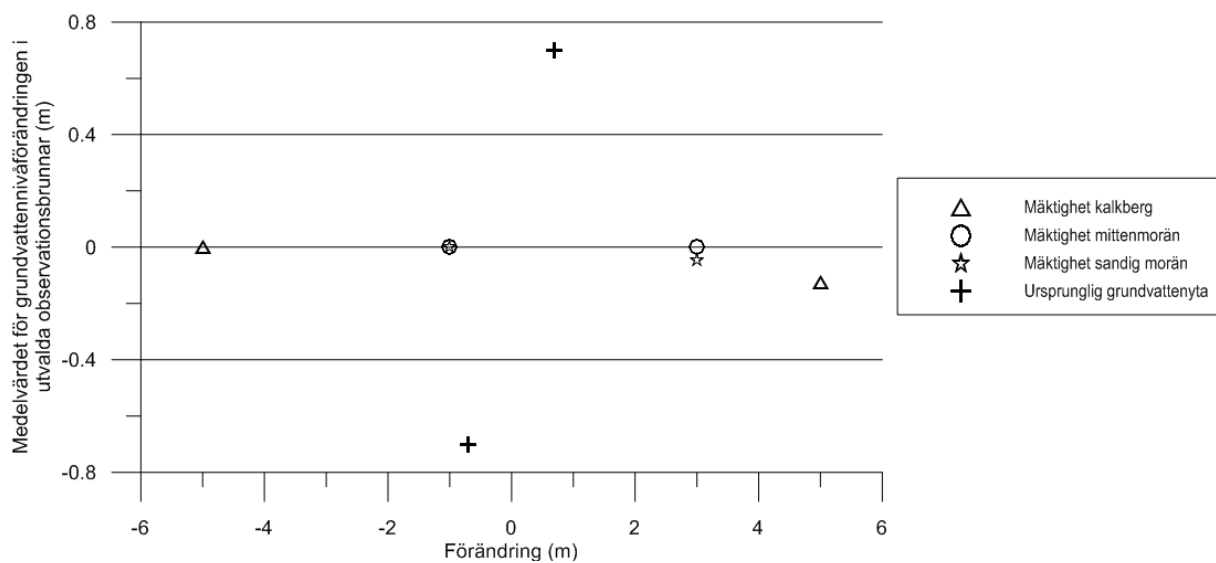
Figur 13 visar medelvärdet för grundvattenförändringen i de fyra utvalda observationsbrunnarna plottat mot den procentuella förändringen för modellparametrar under den simulerade provpumpningen. Grundvattenförändringen ges av att subtrahera de nya grundvattennivåerna från de ursprungliga vilket gör att negativa värden indikerar en sänkt grundvattenyta och positiva värden en höjd yta. För hela känslighetsanalysen sattes de vertikala hydrauliska konduktiviteterna till 33 % av de horisontella. Som kan ses i grafen har både den horisontella hydrauliska konduktiviteten för den övre sandiga moränen och den undre mer tätare moränen obefintlig påverkan på grundvattenpotentialerna. Detta kan förklaras med att moränernas ursprungliga värden för horisontell konduktivitet är väldigt låga samtidigt som mäktigheterna på lagren är små. Kalkbergets konduktivitet skapar däremot de största förändringarna för modellen vilket anses rimligt eftersom det är i kalkberget mest vatten förväntas flöda, vilket speglas av lagrets högre hydrauliska konduktivitet. Lagret har även en större mäktighet vilket gör att modellen påverkas mer av konduktivitetförändringar där. Modellen skapar även en förhöjd grundvattenyta för den ökade konduktiviteten vilket är motsägelsefullt eftersom vatten då bör flöda snabbare och därmed sänka grundvattnet. En förklaring kan vara att randvillkoret för uttagsbrunnen på den vänstra sidan bromsar flödet och därför höjer grundvattennivåerna när mer vatten flödar från den högra sidan.

Avståndet i x-led för den yttre konstanta flödesgränsen, alltså avståndet till pumpbrunnen för den högra sidans vertikala randvillkor i figur 11, påverkar också modellen i någon utsträckning. Dess procentuella utslag gavs genom att först flytta flödesgränsen  $\pm 100$  meter i modellen och sedan beräkna den procentuella förändringen, vilket gav  $\pm 40$  %. En gräns som är ansatt närmare brunnen skapar, per definition, ett mindre influensområde vilket också ökar grundvattennivåerna medan en gräns ansatt längre ifrån brunnen skapar ett större influensområde och därmed en större avsänkningstratt vilket sänker grundvattennivåerna.



Figur 13. Graf som beskriver den procentuella förändringen av parametervärden plottade mot medelvärdet för grundvattenpotentialförändringen. Värdena för mittenmorän och sandig morän är båda mycket små.

Figur 14 visar medelvärdet för grundvattenförändringen i de fyra utvalda observationsbrunnarna plottat mot avståndsförändringen för modellparametrar under den simulerade provpumpningen. Mäktigheterna för de geologiska lagren gav små förändringar i modellen. En ökad mäktighet i kalkberget gav en lägre beräknad grundvattenyta vilket verkar rimligt eftersom det är den huvudsakliga vattenreservoaren och mer plats ges då för vattnet. Samma resonemang ges för ökningen av den sandiga moränens mäktighet. Distansförändringarna för de översta lagren varierar mellan +3 och -1 meter. Anledningen till att -3 meter inte användes som lägsta värde var att mäktigheten på mittenlagret endast uppgick till 2 meter. Förändrad ursprunglig grundvattenyta visade sig som väntat vara den känsligaste parametern för modellen där en ökning eller minskning ger en ekvivalent förändring av grundvattennivåerna i observationsbrunnarna.



Figur 14. Graf som beskriver distansförändringen av parametervärden plottade mot medelvärdet för grundvattenpotentialförändringen.

## 7.2 Teoretiskt fall

Den tvådimensionella modellen för det teoretiska fallet har blivit konstruerad utifrån dess konceptuella modell från kap 5. Eftersom fallet är teoretiskt finns ingen kalibrerings- eller valideringsdata att tillgå. Då det därför inte varit möjligt att genomföra kalibrering och validering har de stegen tagits bort. En känslighetsanalys har genomförts enligt samma principer som för föregående modell men där förändringar i modellen registrerats för grundvatteninflödet till schaktet istället för i observationsbrunnar.

## 7.2.1 Modelluppbyggnad

### 7.2.1.1 Geometri

Modellen har blivit uppbyggd enligt samma principer som för Lorensborgsgatanmodellen. Modellområdets geometri har blivit bibehållen och modellens konceptuella utformning har ritats upp i programmets definitionsstadium. Randvillkor har blivit definierade enligt den konceptuella modellen och med värden presenterade där. Modellens botten utgörs av en nollflödesgräns och schaktet tillsammans med hela modellytan har halverats eftersom det ger upphov till en speglad problemsituation.

### 7.2.1.2 Lagerföljd och grundvattennybildning

Lagerföljden är ansatt enligt den konceptuella modellen där de geologiska enheternas mäktigheter samt hydrauliska egenskaper definieras. Nya volymetriska vattenmängdsfunktioner och konduktivitetfunktioner har skapats där materialen har angivits med jordtyper enligt den konceptuella modellen med en mättad vattenmängd på  $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  och en volymkomprimerbarhet på  $0.0005 /\text{kPa}$ .

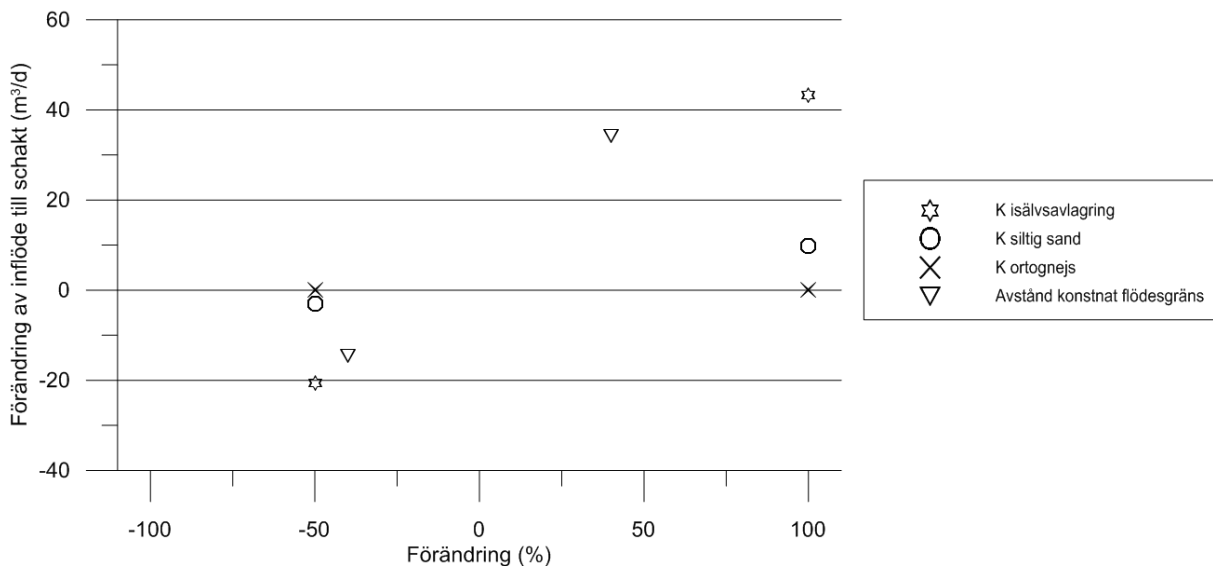
När WC-funktionen är bestämd skapas en hydraulisk konduktivitetfunktion baserat på WC-funktionen. Som uppskattningsmetod väljs Van Genuchten och WC-funktionen väljs till den redan definierade för materialet. Hydraulisk konduktivitet ansätts enligt den konceptuella modellen.

Modellen nybildar grundvatten i form av nederbörd som faller direkt över modellytan. Infiltration sker även för nederbörd som faller utanför modellytan i form av den föreskrivna grundvattenpotentialen som ger upphov till ett basflöde in i modellen.

## 7.2.2 Känslighetsanalys

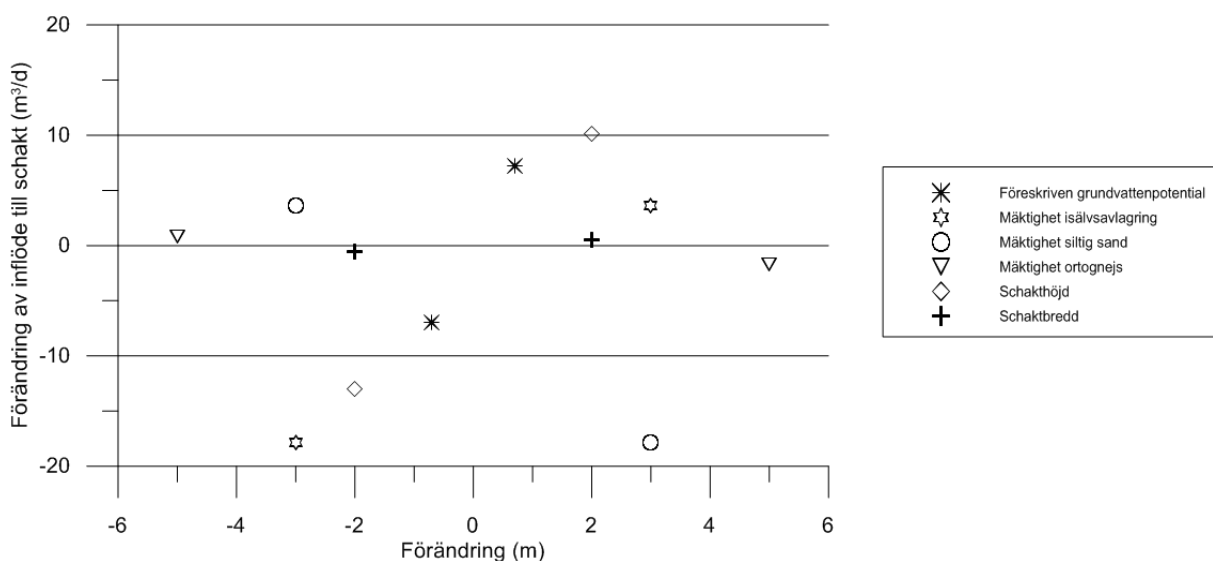
Känslighetsanalysen är gjord i syfte att se hur olika förändringar i modellen påverkar flödessituationen. Eftersom modellen inte har några observationsbrunnar där en grundvattennivåförändring kan registreras baseras känslighetsanalysen på förändringen i inflöde till schaktet. Detta medför att även känsligheten för schaktets storlek kan analyseras. Analysen är utförd som föregående analys där två grafer presenteras varav figur 15 visar de procentuellt förändrade värdena medan figur 16 visar parametrar som förändrats genom avståndsförflyttning.

Grafen i figur 15 visar på att konduktiviteten för gnejsberggrunden samt den siltiga sanden inte skapar stora förändringar medan isälvsavlagringens konduktivitet förändrar inflödet mer. Likt känslighetsanalysen för de analytiska ekvationerna ökar inflödet när konduktiviteten ökar och minskar när konduktiviteten minskar. Även avståndet till den konstanta flödesgränsen utgör en känslig parameter vilket betyder att avståndet från schaktet kan vara för litet. En förlängning av flödesgränsen borde göras så att påverkan på inflödet minskas.



Figur 15. Graf som visar den procentuella parameterförändringen plottat mot förändringar av inflöde till schaktet.

Från grafen i figur 16 kan man se att schaktets bredd spelar en liten roll i inflödesberäkningen medan schaktets höjd spelar en större roll. Höjden av den föreskrivna grundvattenpotentialen avgör var den ursprungliga grundvattennivån ska ligga vilket skapar mer vatten i modellen vid ökning och tvärtom vid minskningar vilket speglas i inflödesförändringen. Påverkan av mäktigheten för gnejsberggrunden är liten medan de övre kvartära avlagringarna skapar desto mer förändring. Det är ökningen av isälvavlagringen samt minskningen av den siltiga sanden som skapar de högre inflödena vilket verkar rimligt eftersom det är isälvmaterial som har den högsta konduktiviteten vilket gör att ökningarna medför större inflöden.



Figur 16. Graf som visar distansförändringen av parametervärden plottat mot förändringar av inflöde till schaktet.



## 8 Numeriska beräkningar i GMS

Grundvattenmodeller har blivit konstruerade i programmet GMS MODFLOW för att kunna jämföra ett mer detaljerat tredimensionellt angreppssätt vid beräkning av inläckage och influensområde. En modell för vardera fall är presenterade i detta kapitel.

### 8.1 Lorensborgsgatan

Den tredimensionella modellen för Lorensborgsgatan har blivit konstruerad utifrån dess konceptuella modell från kap 5. Följande steg har blivit utförda och presenteras nedan:

- Modelluppbyggnad av en regional stationär grundvattenmodell i GMS MODFLOW.
- Kalibrering av den stationära grundvattenmodellen.
- Validering av den stationära grundvattenmodellen.
- Känslighetsanalys för grundvattenmodellen med en kort diskussion.

#### 8.1.1 Modelluppbyggnad

##### 8.1.1.1 Geometri

Modelluppbyggnaden för Lorensborgsgatan började med att definiera modellområdet. GMS är kompatibelt med GIS och alla gränsdragningar och punktdata gjordes därför om till shape-filer i programvaran QGIS. Vektorlager med modellens områdesgränser samt schaktets område gjordes till polygoner och konstruerades med hjälp av bakgrundskartor från sydvästra Malmö.

##### 8.1.1.2 Randvillkor

De yttre randvillkoren (nollflödesgränserna och de konstanta tryckgränserna) bestämdes i GMS genom att göra om punkter till noder på modellens gränslinjer. Ränder med konstant grundvattenpotential definierades därefter med randvillkorspaketet constant head boundary (CHD) där noderna vid ändpunkterna angavs värden för hur stor grundvattenpotentialen var. Grundvattenpotentialerna interpoleras sedan linjärt mellan de båda noderna vilket skapade en linje mellan noderna med en definierad grundvattenpotential (se figur 7). Nollflödesgränser utgjordes i GMS av de linjer som inte blev definierade enligt några andra randvillkor.

Schaktet i modellen simulerades som en dränering där vatten lämnar modellen. Detta är det vanligaste sättet att simulera läckage till schaktningsarbeten under grundvattenytan (Zaidel et.al 2010). Dräneringen simulerades i MODFLOW med randvillkorspaketet drain vilket krävde att man specificerade två parametrar, dräneringsnivån samt konduktansen. Konduktansen är ett mått på hur lätt vattnet flödar ut ur modellen genom dräneringscellerna baserat på Darcy's lag och sätts ofta till ett högt värde vilket indikerar att flödet upplever en låg motståndskraft (Zaidel et.al. 2010).

##### 8.1.1.3 Rutnät

Det finita differensnätet som använts är cellcentrerat med startpunkt i x-led = 369826 och y-led = 6157335. Modellen har tre lager och en varierande cellstorlek baserad på avståndet till schaktområdet där en finare upplösning finns närmast schaktet. Antalet noder i modellen är 177840 stycken.

Referenssystemet som använts för de horisontella koordinaterna är SWEREF 99TM och för höjdsystemet användes RH70. Längden på modellen är 4177 m i x-led och 3547 m i y-led och djupet är 30 meter.

#### 8.1.1.4 Lagerföljd och grundvattennybildning

Eftersom ingen uppmätt topografisk data fanns att tillgå sattes marknivån till en konstant höjd vilken interpolerades genom punktdata gjord i Excel. Totalt gjordes fyra koordinatpunkter i Excel vilka gavs samma höjd och importerades till GMS. Inga uppmätta punktdata för moränernas varierande mäktigheter eller bergets överyta fanns heller att tillgå vilket gjorde att resterande lager också gavs konstanta höjdvärden och interpolerades enligt samma fyra koordinatpunkter. Moränernas mäktighet i modellen sattes till 10 meter där den övre, mindre täta moränen, utgör 8 meter vilket gör att mäktigheten för det mellanliggande tätande moränlagret blir 2 meter. Kalkberget modellerades med en mäktighet på 30 meter.

I GMS infiltreras modellen med randvillkorspaketet recharge (RCH) varvid en daglig nederbördsmängd definieras. Modellens infiltrationsområden har skapats i QGIS och importerats till GMS. Enligt den konceptuella modellen ansätts områdena med olika nederbörd för att återskapa grundvattennybildningen i modellen. Regn som faller utanför modellområdet flödar in och ut i modellen genom de konstanta grundvattenpotentialer som är definierade.

#### 8.1.2 Kalibrering

För att visa att modellen i tillräcklig utsträckning uppvisar den flödessituation som fanns vid Lorensborgsgatan vid tidpunkten för schaktningsarbetet har den jämförts med uppmätta fältdata från området. En kalibrering är sedan gjord där de ingående parametrarna i modellen ändrats för att återskapa de uppmätta värdena under stationära förhållanden. En första manuell kalibrering är gjord följt av en automatiserad kalibrering genom programmodulen PEST. Som indata till kalibreringen har uppmätta grundvattenpotentialer, tagna i samband med provpumpningen som gjordes av Sweco (2000) i området, använts. Grundvattenpotentialerna är presenterade i tabell 17 och figur 39 i Appendix och representerar mätningarna av grundvattenytan precis innan provpumpningen startade.

##### 8.1.2.1 Säkerhetsmarginaler

Figur 39 i Appendix visar var brunnarna är belägna i förhållande till schaktområdet. Brunnarna är uppdelade där de mörka markeringarna visar brunnar hämtade från SGU:s brunnsarkiv med inmätningdatum före schaktområdets påbörjan. De röda markeringarna i figur 39 visar uppmätta nivåer i samband med provpumpningen gjord av Sweco i området (Sweco, 2000). Nivåmätningen från SGU:s brunnar har skett innan anläggningen vid Lorensborgsgatan var påbörjad och anses därför inte vara påverkade av grundvattensänkningen som sker på grund av schaktet. Eftersom det kunde förekommit andra uttag och avsänkningar i området, till exempel temporära avsänkningar, under tiden för inmätningen av SGU:s brunnar har en säkerhetsmarginal på  $\pm 1$  meter satts.

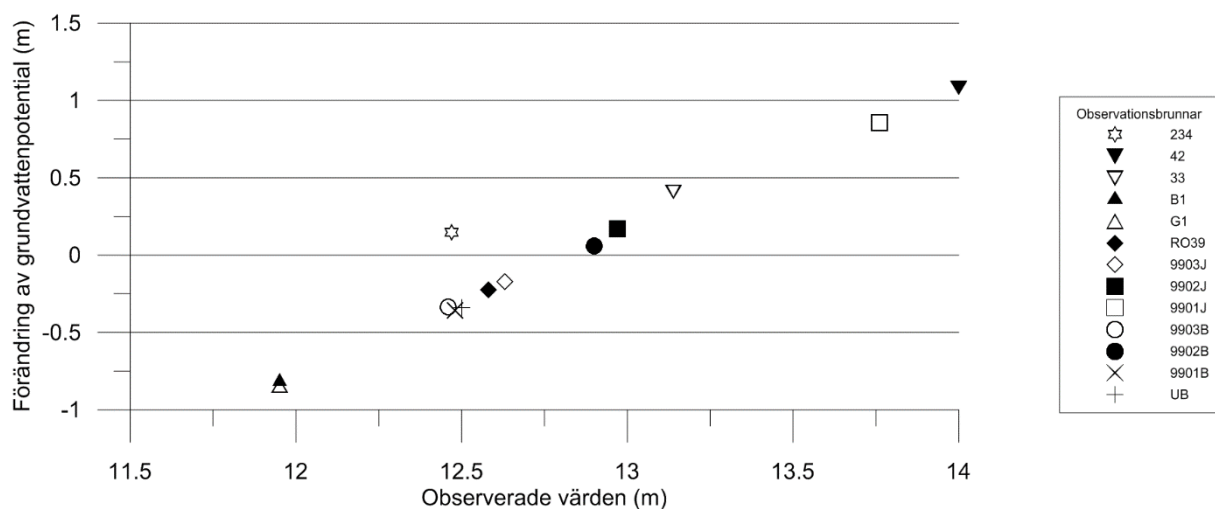
De resterande brunnarna, vilka har mätts in i samband med provpumpningen, kan anses vara en mer trovärdig källa till områdets faktiska grundvattenförhållanden. Säkerhetsmarginalen för brunnar hämtade från provpumpningen sattes till  $\pm 0.5$  meter. Behovet av en så pass stor säkerhetsmarginal kan motiveras med att säsongsvariationer förekommer där det både finns en

naturlig variation samtidigt som det kan finnas uttagsvarierande extraktionsbrunnar i områdets närhet. Det finns även en viss osäkerhet i provtagningskedet.

#### 8.1.2.2 Kalibreringsresultat

Information om grundvattennivå för respektive brunn samt förändringar i parametervärden före och efter kalibreringen presenteras i tabell 17 och 19 i Appendix. Resultaten för kalibreringen kan ses i figur 17 där observerade grundvattenpotentialer är plottade mot avvikelsen från de beräknade grundvattenpotentialerna. Som kan ses i figuren uppvisar resultaten en grundvattennivå där små variationer inte återskapas. Trots detta befinner sig många av de beräknade nivåerna inom deras respektive säkerhetsnivå och kalibreringsresultaten kan anses vara tillräckliga för modellens syfte.

Fyra kalibreringspunkter, B1, G1, 42 och 9901J hamnar utanför sina respektive säkerhetsmarginaler. Orsakerna till ett accepterat kalibreringsresultat trots dessa avvikelser är att observationsbrunnarna ligger förhållandevis nära varandra och att det är, möjligen på grund av bristande information om områdets grundvattenpåverkan, problematiskt att återskapa de små oscillerande variationer som uppstår. En skillnad i hydrauliska egenskaper, exempelvis heterogenitet som inte tagits i beaktning, kan också skapa störningar.



Figur 17. Kalibreringsresultat där observerade värden är plottade mot avvikelsen från de beräknade grundvattenpotentialerna.

Kalibreringen är fokuserad på det område som är närmast schaktet eftersom det är där de flesta observationspunkter finns samlade samtidigt som de två yttersta punkterna har en högre osäkerhet. Modellen anses därför inte vara väl kalibrerad i kanterna vilket gör det svårt att veta om modellen uppvisar korrekta grundvattennivåer där.

En tabell över modellens vattenbalans är presenterad i tabell 10 där det framgår att modellens inflöde stämmer väl överens med dess utflöde vilket indikerar ett lågt numeriskt fel.

Tabell 10. Vattenbalans för kalibreringen.

Vattenbalans	In (m3/d)	Ut (m3/d)
Föreskriven grundvattenpotential	80,47104537	-327,6806227
Infiltration	247,2	0,0
Total vattenbalans	327,7	-327,7

Den kalibrerade modellens statistiska mått är presenterade i tabell 11. Medelresidualen är samma som medelfelet för observationerna vilket kan vara missledande eftersom positiva och negativa värden kan ta ut varandra. Däremot så visar absolutbeloppet av medelresidualerna det absoluta felet för observationerna där ingen hänsyn tas till negativa eller positiva värden vilket ger modellens faktiska medelfel. Roten ur den kvadrerade medelresidualen räknas fram genom att ta roten ur medelvärdet av de kvadrerade residualerna. Detta ger ett bättre uppskattat värde av medelfelet när större avvikelser inom de observerade felen finns. Medelresidualen är bra men absolutbeloppen av medelresidualen visar på en skillnad i beräknade och observerade punkter. Modellmässigt bör dessa värden vara så låga som möjligt (Ground-Water Modeling System, 2010).

Tabell 11. Den kalibrerade modellens statistiska mått.

	Värde
Medelresidualen	-0.03
Absolutbeloppet av medelresidualen	0.45
Roten ur den kvadrerade medelresidualen	0.55

### 8.1.3 Validering

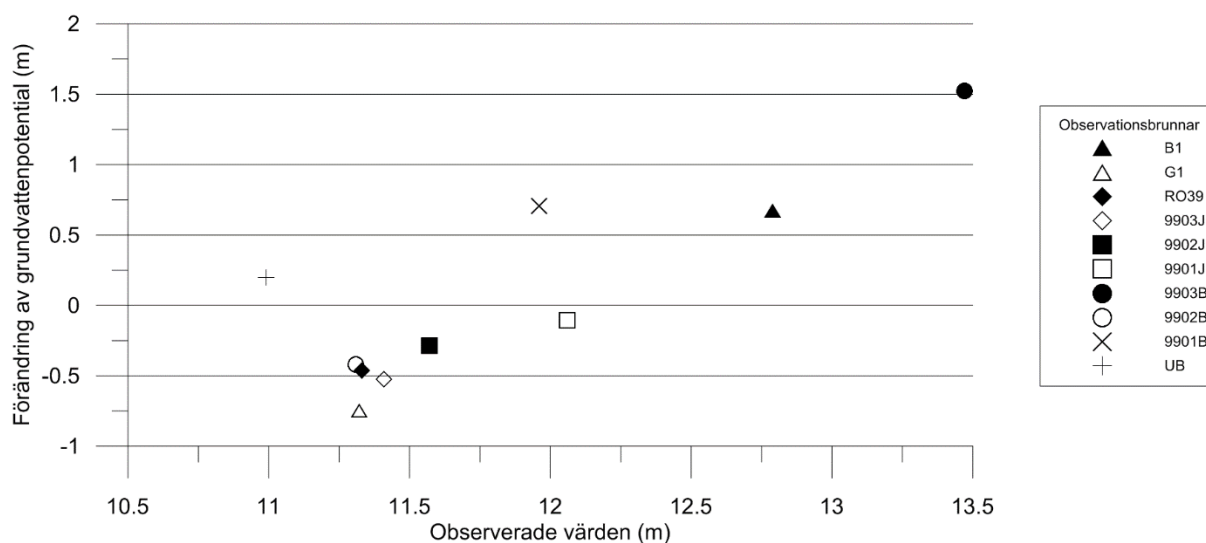
Eftersom en uppsättning mätpunkter kan generera bra kalibreringsresultat med en mängd olika uppsättningar parametervariationer görs en validering av modellen. En modell anses vara validerad om dess noggrannhet och förutsägbarhet har bevisats ligga inom accepterade felmarginaler då den är testad mot en uppsättning data som är oberoende av kalibreringsdata (Andersson och Woessner, 1992).

Valideringsdata som använts för Lorensborgsgatan är den provpumpning som gjorts av Sweco inför det planerade arbetet (Sweco, 2000). Information om grundvattennivå för respektive brunn finns i tabell 18 i Appendix. Avsänkningen är under provpumpningen skapad av en kontinuerlig pumpning av 311 m<sup>3</sup>/d (3,6 l/s) och innan pumpningen avslutades ansågs stationära förhållanden ha uppnåtts. Valideringen är gjord med stationära förhållanden med de slutgiltiga avsänkingsnivåerna men en transient simulering hade också kunnat genomföras varvid mer noggranna resultat angående avsänkingsförlopp hade kunnat fås. Eftersom brunnarna som användes till valideringen var samma som de som användes till kalibreringen sattes säkerhetsmarginalen återigen till ±0.5 meter.

#### 8.1.3.1 Valideringsresultat

Resultaten av valideringen är presenterade i figur 18 där de observerade värdena har plottats mot avvikelsen från de beräknade grundvattenpotentialerna. Valideringen visar på ett resultat

där hälften av brunnarna inte håller sig inom sina säkerhetsmarginaler. Däribland ingår brunnarna B1, 9901B, 9903B, 9903J och G1 vilka har beräknade värden som antingen hamnar under eller över deras respektive observerade värde.



Figur 18. Valideringsresultat där observerade värden är plottade mot avvikelserna från de beräknade grundvattenpotentialerna.

Modellens medelfel och absolutbelopp är presenterade i tabell 12 där medelresidualen och dess absolutbelopp visar på en större statistisk felaktighet än för kalibreringen. Eftersom antalet observationspunkter är begränsade samt att propvpumpningen skedde med ett konstant uttagsflöde till stationära förhållanden anses modellen ändå uppvisa ett bra valideringsresultat.

Tabell 12. Den validerade modellens statistiska mått.

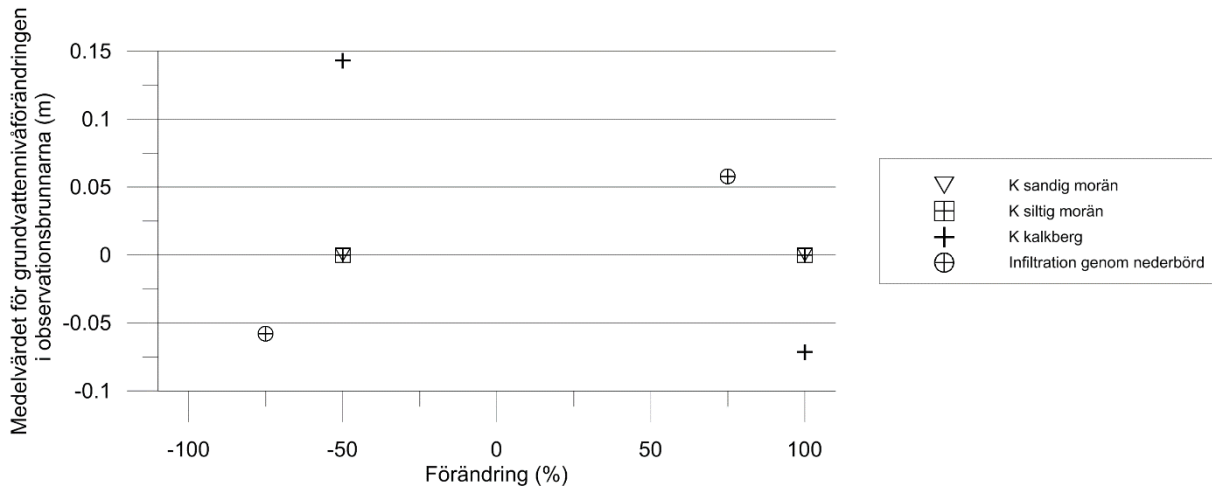
	Värde
Medelresidualen	-0.44
Absolutbeloppet av medelresidualen	0.86
Roten ur den kvadrerade medelresidualen	1.33

#### 8.1.4 Känslighetsanalys

Två grafer presenteras nedan där figur 19 visar parametrar som förändrats med en procentsats och figur 20 visar parametrar som ändrats med ett avstånd i meter. Beräknade grundvattennivåer subtraherades från de observerade vilket gav sänkta grundvattennivåer (d v s lägre beräknade än observerade grundvattennivåer) för negativa parameterförändringar och höjda för positiva parameterförändringar.

Figur 19 visar medelvärdet för grundvattenförändringen i observationsbrunnarna plottat mot den procentuella förändringen för modellparametrar. Alla vertikala hydrauliska konduktiviteter har ansatts till 33 % av den horisontella. Grafen visar att den horisontella hydrauliska konduktiviteten i de övre moränlagren inte skapar någon förändring av grundvattenyta. Modellen är däremot känslig för värdet på konduktiviteten i kalkberget vilket verkar rimligt eftersom det utgör det mäktigaste samt mest vattenförande lagret. En ökning av konduktiviteten

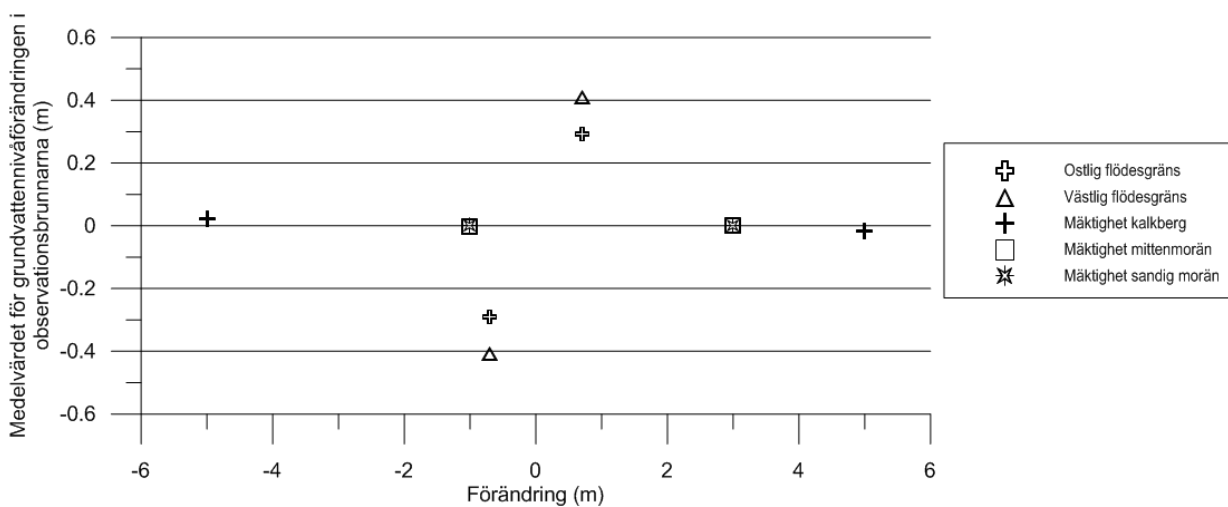
i kalkberget skapar en lägre grundvattenyta vilket också verkar rimligt eftersom ett snabbare flöde då sker genom modellen. Modellen reagerar dock mer på en sänkt konduktivitet i kalkberget vilket genererar en förhöjd grundvattenyta. Infiltrationen till grundvattnet för infiltrationsområdena har enligt grafen ungefär lika stor modellpåverkan.



Figur 19. Graf som beskriver den procentuella förändringen av parametervärdena plottade mot medelvärdet för grundvattenpotentialförändringen.

Figur 20 visar medelvärdet för grundvattenförändringen i observationsbrunnarna plottat mot avståndsförändringen i meter för modellparametrar. Mäktigheterna för de geologiska lagren har mindre inverkan på modellen där endast det mer vattenförande kalkberget ger en liten indikation på förändring. Ett mer mäktigt vattenförande lager skapar en lite lägre grundvattenyta vilket kan förklaras med att vattnet från den föreskrivna grundvattenpotentialen då har en större volym att befinna sig i.

Modellen är som mest känslig för de östliga och västliga föreskrivna grundvattenpotentialerna vilka skapar högre grundvattennivåer vid ökning och lägre vid avsänkningar.



Figur 20. Graf som beskriver parameterförändringen i meter plottade mot medelvärdet för grundvattenpotentialförändringen.

## 8.2 Teoretiskt fall

Den tredimensionella modellen för det teoretiska fallet har blivit konstruerad utifrån dess konceptuella modell från kap 5. Ingen kalibrerings- eller valideringsdata fanns att tillgå och det har därför inte varit möjligt att genomföra någon kalibrering eller validering. En känslighetsanalys har genomförts enligt samma principer som för föregående modell men där känsligheten hos modellen studerats genom det beräknade grundvatteninflödet till schaktet istället för beräknade grundvattennivåer i observationsbrunnar.

### 8.2.1 Modelluppbyggnad

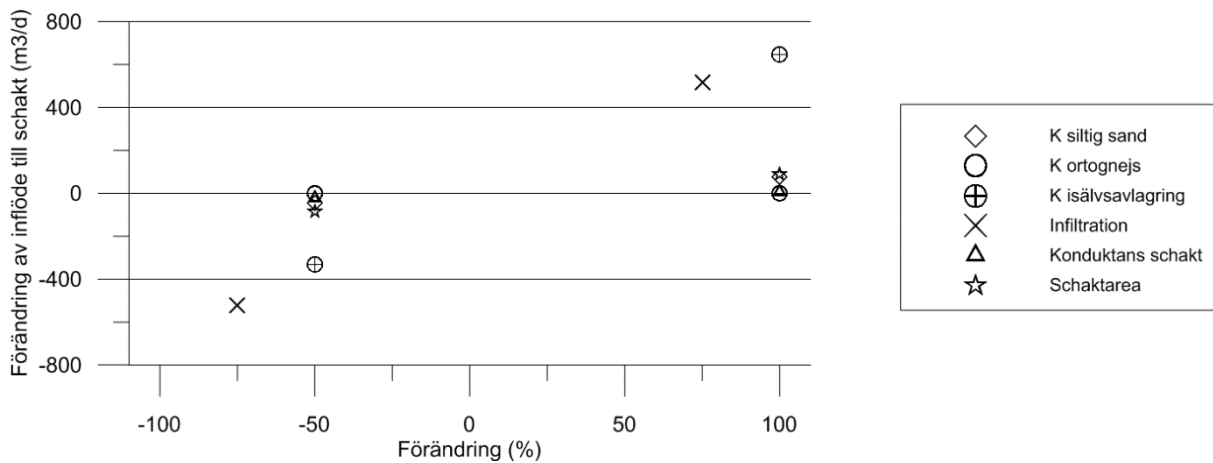
Modellen är uppbyggd enligt samma principer som för Lorensborgsgatanmodellen. Modellområdets gränser är definierade på samma sätt som för föregående modell där QGIS återigen användes för att skapa shape-filer vilka sedan importerats till GMS. Modellens randvillkor följer också föregående modells där nya värden antas enligt den konceptuella modellen.

#### 8.2.1.1 Lagerföljd och grundvattennybildning

En lagerföljd definieras enligt den konceptuella modellen. Den geologiska lagerföljden består av tre lager som är ansatta vertikalt i modellen med hjälp av värden framtagna för de olika lagernas lägen. Dessa interpoleras sedan av GMS och kopplas till FE-nätet. Grundvattennybildning sker genom nederbörd som faller över modellytan. Den nederbörd som faller utanför modellytan simuleras i modellen genom de föreskrivna grundvattenpotentialer som ansätts vid modellens östra och västra gränser och ger in- och utflöde.

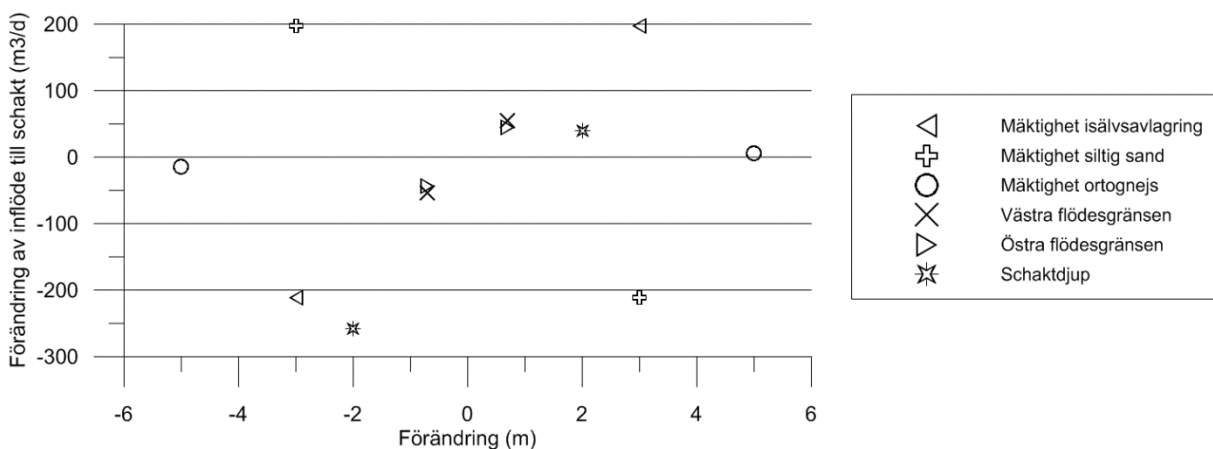
### 8.2.2 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen är uppdelad på två grafer. Figur 21 visar hur procentuella förändringar av modellparametrar påverkar inflödet till schaktet medan figur 22 illustrerar känsligheten för nivå- eller mäktighetsförändringar i meter. I figur 20 kan ses att varken schaktarean, schaktets konduktans, konduktiviteten för den undre siltiga sanden eller konduktiviteten för gnejsberggrunden har särskilt stor inverkan på inflödet i schaktet. De parametrar som tydligast påverkar är infiltrationen från nederbörd samt den hydrauliska konduktiviteten från isälvsavlagringen. Dessa skapar relativt stora förändringar i inflödesvolymen vilket kan göra det viktigt att lägga extra resurser på att bestämma dessa parametrar. På grund av tidsbrist förändrades inte den totala arean av modellområdet.



Figur 21. Graf som visar den procentuella förändringen av parametervärden i relation till resulterande förändringar av beräknat inflöde till schaktet.

Figur 22 visar att gnejsberggrunden inte påverkar inflödet i någon större utsträckning. Däremot fås betydande förändringar i inflödet av i princip alla andra parametrar där högst förändring kan utläsas för mäktigheten hos isälvavlagringarna, mäktigheten hos den siltiga sanden samt schaktdjupet. Mäktigheternas förändringar utlöser förväntade resultat eftersom ett mer genomsläppligt material ökar i mäktighet. Schaktdjupet påverkar dock inflödet mer drastiskt vid minskning än vid ökning vilket möjligen kan ha att göra med att djupökningen sker i ett mer tätt material vilket transporterar en lägre andel av det inflödande vattnet.



Figur 22. Graf som visar den parameterförändringen i meter i relation till resulterande förändringar av beräknat inflöde till schaktet.



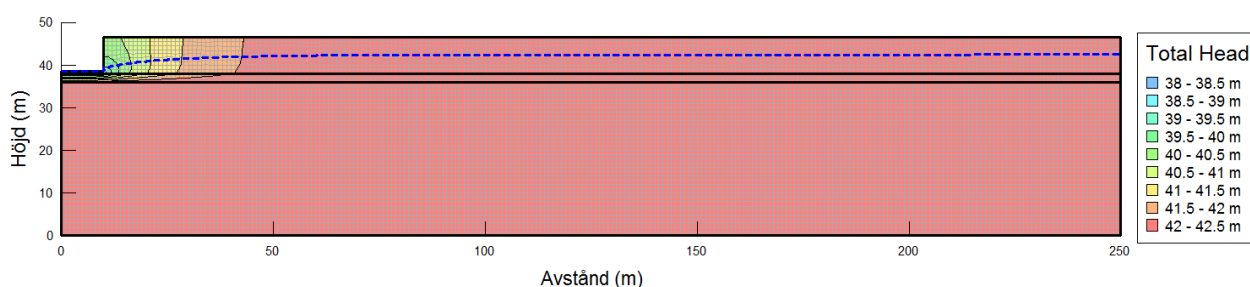
## 9 Resultat och diskussion

I följande kapitel presenteras resultaten för grundvatteninflödet och avsänkningens utbredning för de båda undersökta fallen. Eftersom metodernas resultat först presenteras på något olika sätt återfinns ett gemensamt jämförande stycke i avsnitt 9.3. Beräknade värden för varje metod och fall återfinns i tabellform i tabell 16. De numeriska modellernas resultat presenteras i avsnitt 9.1 och 9.2 enbart med sina ursprungliga parametervärden medan de analytiska lösningarna även presenteras med förändrade hydrauliska konduktiviteter. Samtliga modeller innehåller förenklingar och osäkerheter samtidigt som inga uppmätta grundvatteninflöden eller influensområdesgränser finns tillgängliga och det går därför inte att säga att något resultat är mer tillförlitligt än andra.

### 9.1 Lorensborgsgatan

#### 9.1.1 SEEP/W

De numeriska resultaten från den tvådimensionella modellen för Lorensborgsgatan simulerat i SEEP/W presenteras nedan. Figur 23 visar modellens uppbyggnad i SEEP/W med yttre modellgränser och geologiska lager i vertikalled indelade med svarta streck. En beräknad grundvattennivå i form av den blå streckade linjen samt schaktets utformning kan urskiljas i det övre sandiga moränlagret. Färgkodningen beskriver den totala vattenpotentialen i varje nod i modellen varvid en tydlig avsänkning sker i närheten av schaktet. Enligt figur 23 kan det urskiljas ett väldigt litet flöde från lermoränen i mitten och inflödet från det underst liggande kalkberget är också litet. Detta kan förklaras med att den slitiga moränen belägen i mitten stoppar upp flödet från kalkberget vilket medför att majoriteten av det inflödande vattnet kommer från de två översta lagren. Inget regn har simulerats vilket skulle kunnat påverka inläckaget och influensområdet. Inflödesberäkningen är baserad på de ytor som utgör schaktets sida och botten och eftersom modellen är speglad har det totala inflödet räknats fram genom att multiplicera grundvatteninflödet i schaktet med två. Eftersom inflödet i modellen ges i  $\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$  behöver detta även multipliceras med schaktets längd på 200 meter multipliceras in.

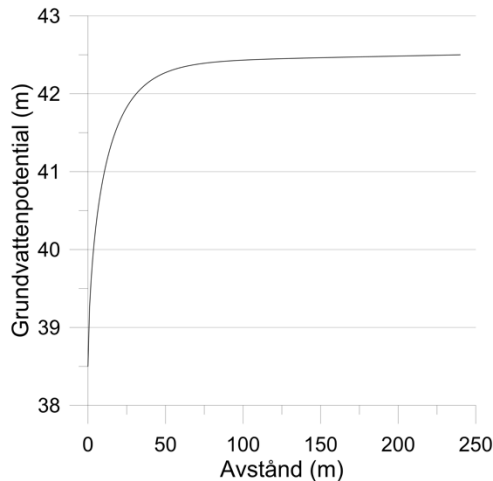


Figur 23. Modelleringsresultat av Lorensborgsgatan i SEEP/W. Färgkodningen visar den totala grundvattenpotentialen i m ö h.

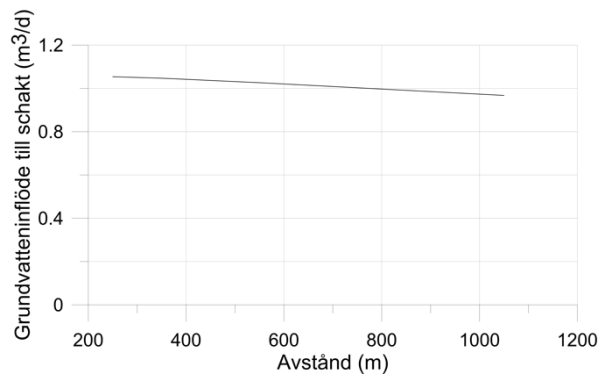
Eftersom den högra vertikala grundvattenpotentialen är ansatt med ett godtyckligt avstånd från schaktet förändrades dess avstånd i positivt x-led i syfte att urskilja skillnader i influensområdets utbredning samt grundvatteninflödet. Figur 24 visar grundvattenpotentialen från schaktets ytterkant. Grafen planar av vid ett avstånd av ca 100 meter från schaktkanten och antar ett värde nära den ursprungliga grundvattenpotentialen på 42,5 meter. Influensområdet

antas vara cirkulärt. Eftersom influensradien återfanns inom modellområdet behövdes inte avståndet till den vertikala grundvattenpotentialen förändras.

Figur 25 visar grundvatteninflödet till schaktet då avståndet för den högra föreskrivna grundvattenpotentialen förflyttats i positivt x-led från schaktet. Inflödet noterades vid avstånden 250 m, 350 m, 450 m, 550 m samt 1050 m från schaktet och grafens lutning beräknades vilket gav medelvärdet för inflödet på 1,03 m<sup>3</sup>/d.



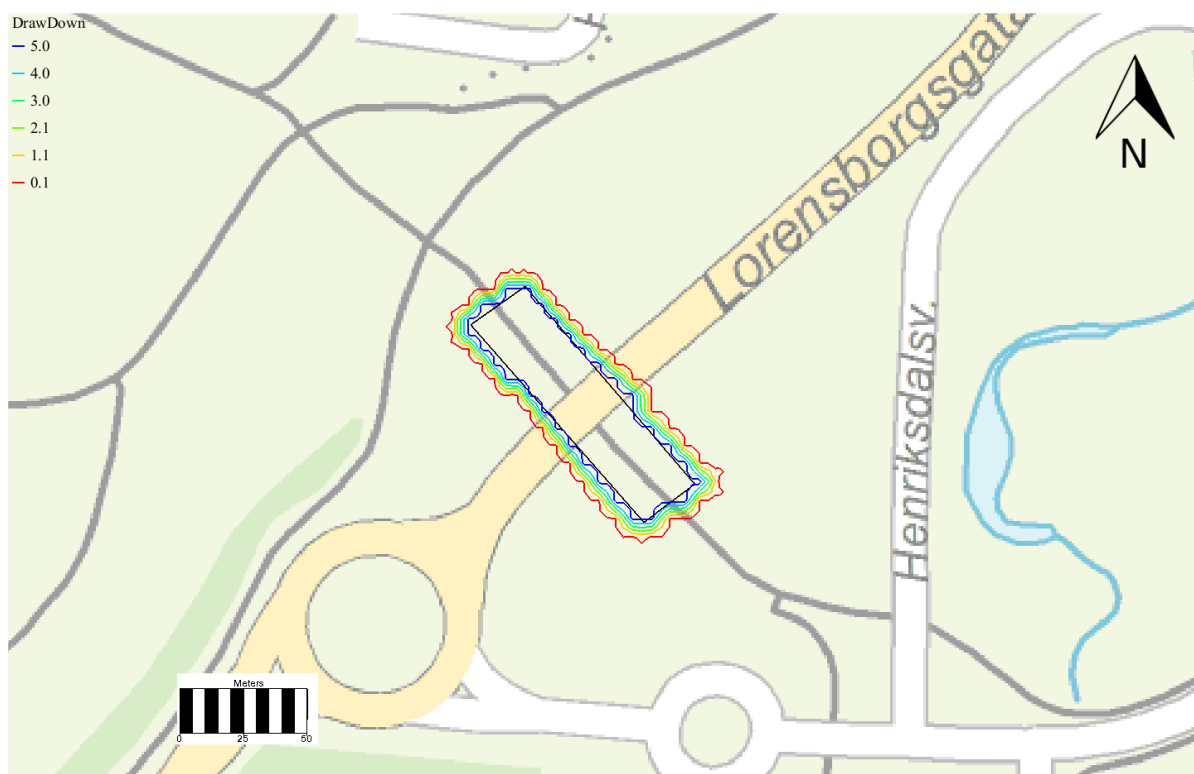
Figur 24. Avsänkning för Lorensborgsgatan.



Figur 25. Inflöde till schakt för Lorensborgsgatan.

### 9.1.2 GMS

De numeriska resultaten från den tredimensionella modellen för Lorensborgsgatan simulerat i GMS MODFLOW presenteras nedan. Figur 26 visar modellområdet med ett simulerat schakt i mitten och med en avsänkning som motsvarar 0,1 meter utritad som en röd linje. En avsänkning med 0,1 meter anses vara godtagbart när det kommer till påverkan på viktiga skyddsobjekt. Avsänkningen i GMS beräknas genom att ansätta en ursprunglig grundvattenyta som startvärden. Schaktet implementeras därefter i modellen vilket skapar en avsänkning nära schaktområdet. Omgivningspåverkan från schaktet var väldigt liten vilket inte var helt oväntat. Influensområdet antar en rektangulär form runt schaktområdet med ett avstånd på ca 11 meter från schaktkanten. Avsänkningen som visas sker endast i det övre siltiga jordlagret men eftersom vatten förvänta läcka in underifrån kan även en avsänkning i moränleran och kalkberget ske. Den relativt branta hydrauliska gradienten som uppstår nära schaktet är en följd av den låga hydrauliska konduktiviteten som finns i de båda ovanliggande moränlagren. Eftersom känslighetsanalysen endast fokuserade på förändrade grundvattennivåer gjordes inga försök att förändra schaktdjupet och schaktarean. Detta hade varit intressant att undersöka eftersom djupet av schaktet går ner till gränsen mellan det tätare moränlagret och det siltiga moränlagret och ökades djupet så att schaktbotten hamnade i det tätare lagret skulle varje dräneringscell i modellen bli torr. Nästan inget vatten fanns tillgängligt för botteninströmning då schaktbotten placeras i ett mer tätt material.



Figur 26. Påverkansområden för Lorensborgsgatan.

Modellens vattenbalans presenteras i tabell 13 där inflöden och utflöden för de olika randvillkoren visas. Dräneringen för schaktet uppnår ett utflöde på 3,3 m<sup>3</sup>/d. Detta är ett relativt litet uttag ur modellen sett över resterande in- och utflöden vilket verkar rimligt eftersom modellen har ett konstant basflöde där mycket vatten förväntas rinna genom det underliggande kalkberget. Vattnet som rinner in i schaktet kan till stor del tänkas komma från den infiltration som sker i form av nederbörd vilken, enligt känslighetsanalysen, har en stor effekt på modellens grundvattennivåer.

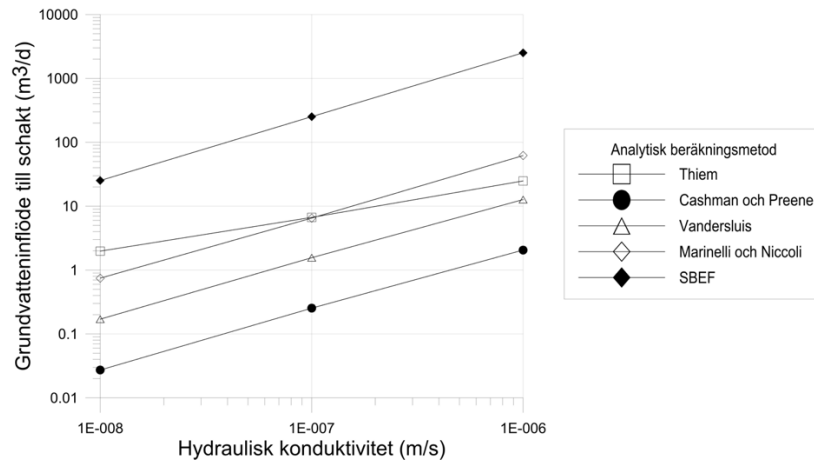
Tabell 13. Vattenbalans för Lorensborgsgatan med schakt.

Vattenbalans	In (m <sup>3</sup> /d)	Ut (m <sup>3</sup> /d)
Föreskriven grundvattenpotential	81,9	-325,8
Dränering	0	-3,3
Infiltration genom nederbörd	247,2	0
Total vattenbalans	329,2	-329,1

### 9.1.3 Analytiska beräkningar

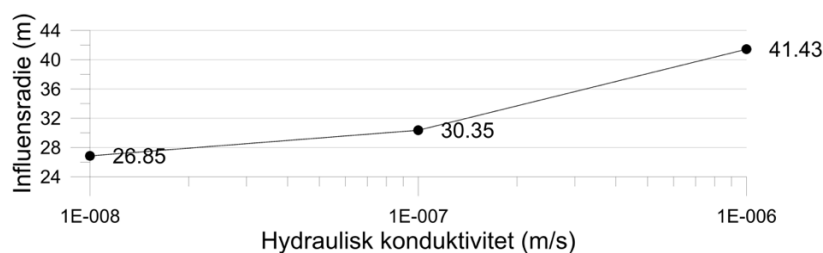
Resultaten av de analytiska beräkningarna för Lorensborgsgatan presenteras nedan där grundvatteninflöden till schaktet visas i figur 27 och beräknade influensområden i figur 28. Ekvationernas beräknade inflöde och influensområde presenteras med en konduktivitet som varierar med plus/minus en tiopotens. Grafens axlar har valts att göras logaritmiska för att tydligare kunna se hur ekvationerna skiljer sig åt. Eftersom ekvationerna skiljer sig mycket åt i sin utformning och sina antaganden är en diskussion om storleksordningar istället för exakta värden mer intressant. Cashman och Preenes ekvation för linjärt flöde beräknar det lägsta

inflödet medan SBEF beräknar de högsta värdena. Cashman och Preenes lägsta värde kan bero på att den räknar med linjära flöden istället för radiella vilket kan påverka inflödet då schaktet är stort samtidigt som schaktet antas vara delvis penetrerande vilket också bör minska inflödet. Thiem, Vandersuis och Marinelli och Niccoli hamnar relativt nära varandra och beräknar ett inflöde i storleksordningarna 1-10 m<sup>3</sup>/d. Alla ekvationer uppvisar större värden när konduktiviteten ökar och eftersom det är en logaritmisk axel ökar också skillnaderna mellan dem. Detta observerades även i känslighetsanalysen och betyder att områden som Lorensborgsgatan som består av material med relativt låga hydrauliska konduktiviteter också har en förhållandevis stor tolerans när det kommer till ekvationsval och ekvationsanpassning.



Figur 27. Inflöden beräknade med analytiska metoder. Inflödet är plottat mot en förändrad hydraulisk konduktivitet.

Eftersom radien endast beräknades med Sichardts ekvation har resultatet från beräkningen illustrerats i figur 28. Förändringen i konduktivitet ger upphov till ett nästan linjärt samband. Influensområdets utformning antas vara cirkulärt eftersom de flesta ekvationerna antar ett radiellt flöde. Ett tolkningsproblem kan uppstå när schaktet är stort och materialen runt schaktet är relativt täta eftersom det då inte uppstår någon större skillnad mellan den ekvivalenta brunnsradien och den beräknade influensradien, vilken antas börja i mitten av schaktet när det gjorts om till en cirkel. Enligt Sichardts ekvation bör influensradier under 30 meter undvikas vilket gör att den beräknade radien på 26,85 m för  $k=10E-08$  m/s inte ska ses som trovärdigt. Radien för det ursprungliga  $k=10E-7$  m/s beräknas till 30,35 m vilket också gör att trovärdigheten för värdet bör ifrågasättas. Influensradien är här uträknad till den punkt närmast centrum av schaktet där grundvattenytan är identisk med den ursprungliga innan påverkan av schaktet.

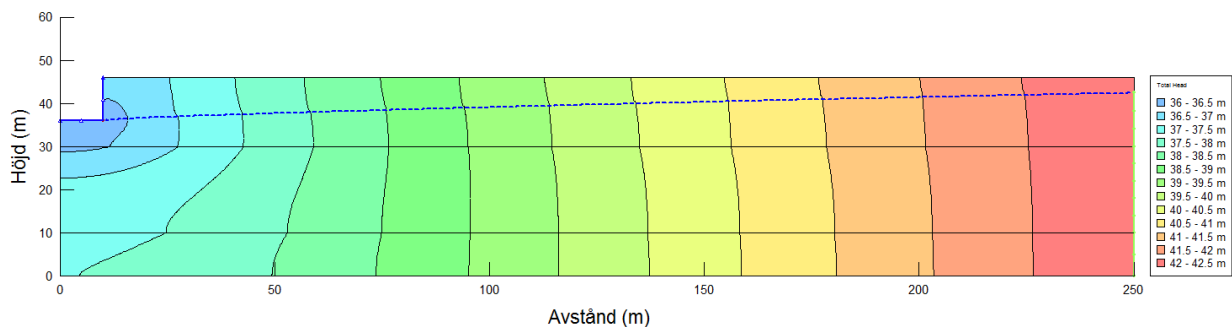


Figur 28. Analytiskt beräknade influensradie för en schakt vid Lorensborgsgatan för olika hydraulisk konduktivitet.

## 9.2 Teoretiskt fall

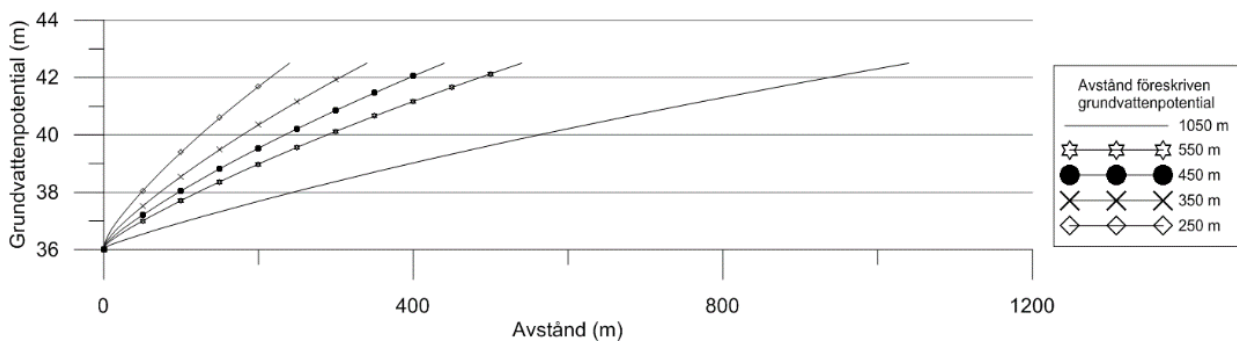
### 9.2.1 SEEP/W

De numeriska resultaten från den tvådimensionella modellen för det teoretiska fallet simulerat i SEEP/W presenteras nedan. Figur 29 visar flödessituationen där färgkodningen visar den totala grundvattenpotentialen för varje nod i modellen varvid ett snabbare flöde kan observeras i de övre lagren och ett något långsammare i det understa berglagret. De svarta horisontella strecken är den geologiska indelningen. En grundvattennivå representeras av den streckade blå linjen där samma grundvattennivå gäller i alla tre lagren.

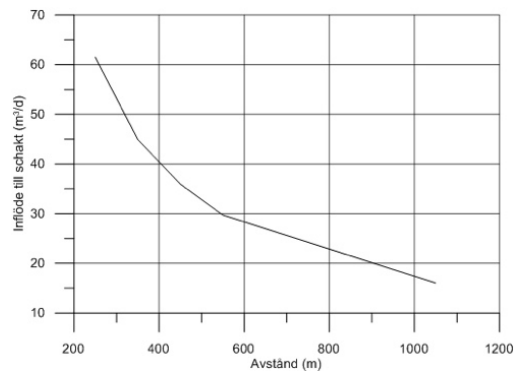


Figur 29. Modellresultat för det teoretiska fallet från SEEP/W.

Figur 30 visar grundvattenpotentialer för det teoretiska fallet när den högra föreskrivna grundvattenpotentialgränsen (se figur 11) har blivit förflyttad åt höger i modellen. Detta gjordes för att se om det gick att få avsänkningskurvan att plana ut och därmed fastställa en influensradie samtidigt som grundvatteninflödets förändring på grundvattenpotentialgränsens avstånd kunde analyseras. Gränsen flyttades med samma avstånd som för Lorensborgsmodellen och grafen visar att avsänkningarna inte uppnår en utplaning ens vid det längsta avståndet från schaktet. Detta betyder att gränsens läge utgör början för avsänkningarna och därmed är avståndet till gränsen också samma som influensradien. Den påverkan som gränsförflyttningen hade på inflödet till schaktet visas i figur 31 där det tydligt framgår att avståndet till gränsen har en stor påverkan på hur mycket vatten som flödar in i schaktet. Den förflyttade flödesgränsen skapar en variation i inflöde mellan ca  $15 \text{ m}^3/\text{d}$  till ca  $60 \text{ m}^3/\text{d}$  med ett medelvärde på  $38 \text{ m}^3/\text{d}$ .



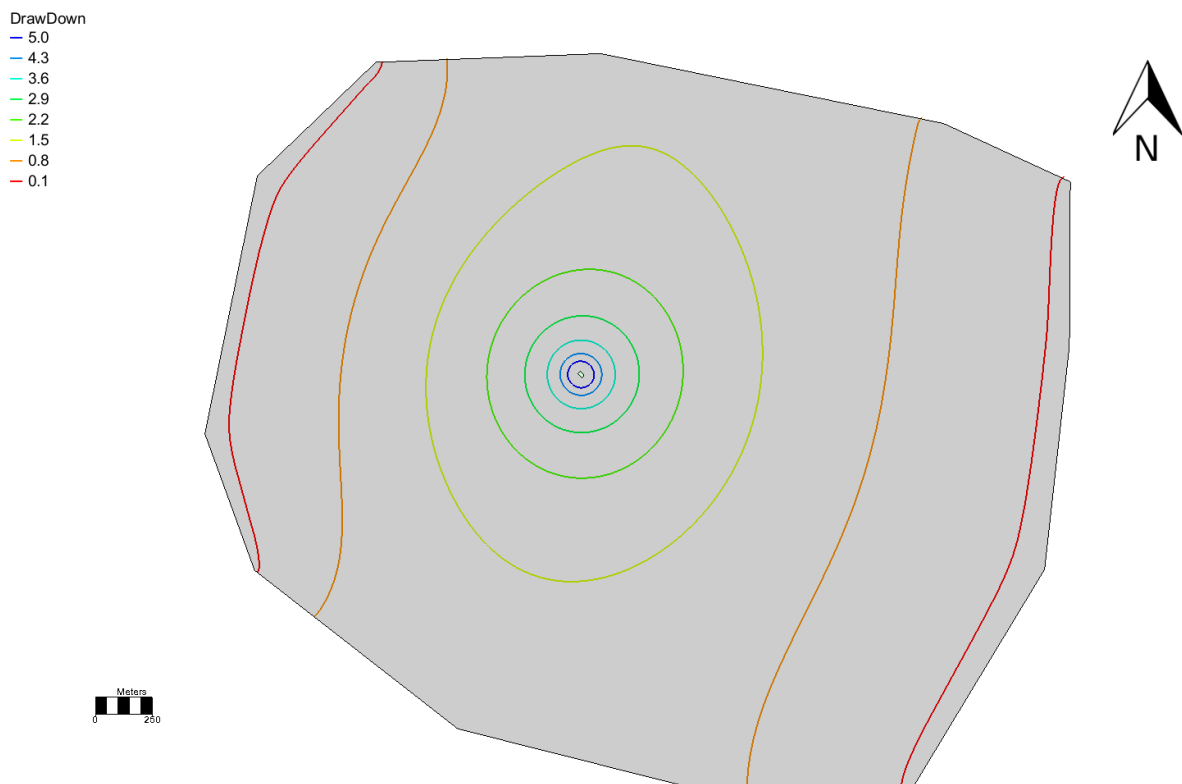
Figur 30. Avsänkning för det teoretiska fallet. De olika avsänkningarna representerar förändrade avstånd av den föreskrivna grundvattenpotentialen från schaktväggen.



Figur 31. Inflöde till schaktet plottat mot avstånd för den föreskrivna grundvattenpotentialen.

### 9.2.2 GMS

De numeriska resultaten från den tredimensionella modellen för det teoretiska fallet simulerat i GMS MODFLOW presenteras nedan. Figur 32 visar hela modellområdet i grått med schaktets läge i mitten och med utritade avsänkningsnivåer där den röda yttersta linjen omfattar det område där en avsänkning sker med 0,1 meter eller mer. Avsänkning för 0,1 meter sträcker sig utanför modellområdet vilket indikerar att modellområdet är för litet. Ett modelleringsscenario där hela schaktets avsänkning förblev innanför modellområdet hade visat ett influensområde opåverkat från modellgränserna. Eftersom vatten antas flöda parallellt med den norra och södra gränsen kommer avsänkning nå även utanför modellgränsen. Kartan tillsammans med schaktets läge och det beräknade influensområdet importerades till QGIS där influensradien kunde bestämmas till 1500 meter.



Figur 32. Influensområden för det teoretiska fallet beräknat med GMS.

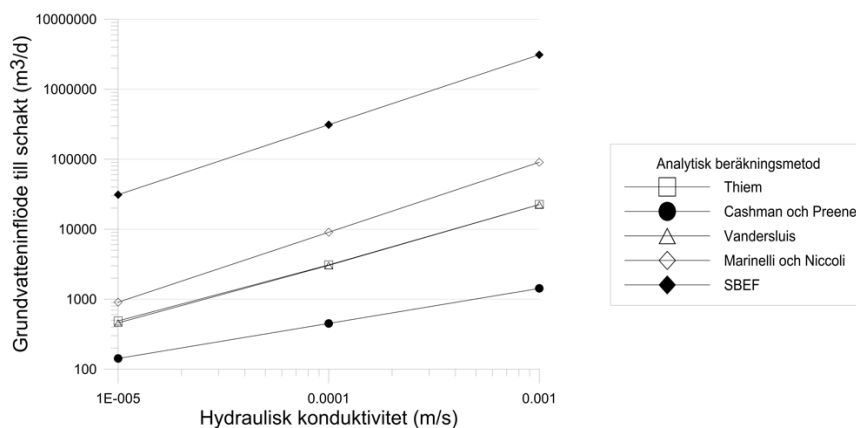
Modellens vattenbalans presenteras i tabell 14 där inflöden och utflöden för de olika randvillkoren visas. Dräneringen till schaktet uppgår till ett flöde av 922,56 m<sup>3</sup>/d. Som vattenbalansen visar nybildas grundvatten framförallt av genom nederbörd. Detta beror på de mycket genomsläppliga material som utgör de översta lagren i modellen samtidigt som modellens begränsande gränser kan orsaka att regnvattnet stängs in i modellen och skapar orealistiska grundvattennivåer.

Tabell 14. Vattenbalans för det teoretiska fallets modell i GMS.

Vattenbalans	In (m <sup>3</sup> /d)	Ut (m <sup>3</sup> /d)
Föreskriven grundvattenpotential	27,4	-93,8
Dränering	0	-922,6
Infiltration genom nederbörd	988,9	0
Total vattenbalans	1 016,3	-1 016,4

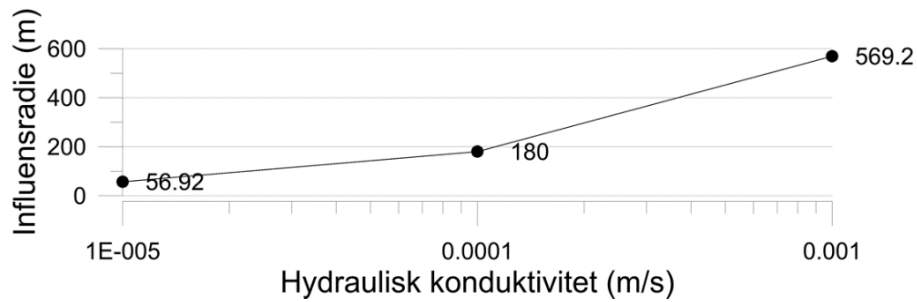
### 9.2.3 Analytiska beräkningar

Resultaten av de analytiska beräkningarna för det teoretiska fallet presenteras nedan där grundvatteninflöden till schaktet visas i figur 33 och beräknade influensområden i figur 34. Ekvationernas beräknade inflöde och influensområde presenteras återigen med en konduktivitet som varierar med plus/minus en tiopotens och axlarna har valts att göras logaritmiska för att tydligare kunna se hur ekvationerna skiljer sig åt. Observeras värdena för  $k=10E-4$  m/s ger SBEF betydligt högre värden även här. Cashman och Preenes linjära flödesekvation beräknar det minsta värdet på ca 500 m<sup>3</sup>/d samtidigt som Thiem, Vandersluis och Marinelli och Niccoli samlas kring värden mellan 3000-9000 m<sup>3</sup>/d. Spridningen mellan ekvationernas resultat är alltså stor samtidigt som storleksordningen har förändrats jämfört med Lorensborgsgatan. Ekvationerna beter sig på liknande sätt och hamnar i samma ordning som för Lorensborgsgatans resultat med skillnaden att marken nu består av material med mycket högre hydraulisk konduktivitet. Den hydrauliska konduktiviteten är betydligt högre vilket kan ses i figur 33 som nu visar på större storleksordningar. Ekvationerna visar även samma utspridningseffekt när konduktiviteten ökar vilket medför att området vid det teoretiska fallet har högre krav på sig när det kommer till att fastställa hydrauliska konduktiviteter i området eftersom en liten överskattning i konduktivitet kan resultera i grova överskattningar vid inflödesberäkningarna.



Figur 33. Inflöden beräknade med analytiska metoder. Inflödet visas för olika värden på hydraulisk konduktivitet.

Influensradien beräknad med Sichardts ekvation kommer här fram till en radie på 180 meter vid  $k=10E-4$  m/s. Ekvationen ger upphov till ett nästan linjärt samband mellan konduktivitet och radie och alla radier är inom de angivna gränsvärdena. Eftersom de hydrauliska konduktiviteterna för det teoretiska fallet möjliggör ett högre grundvattenflöde blir också avsänkningstratten i området större.



Figur 34. Analytiskt beräknade influensradier för det teoretiska fallet vid olika värden på hydraulisk konduktivitet.

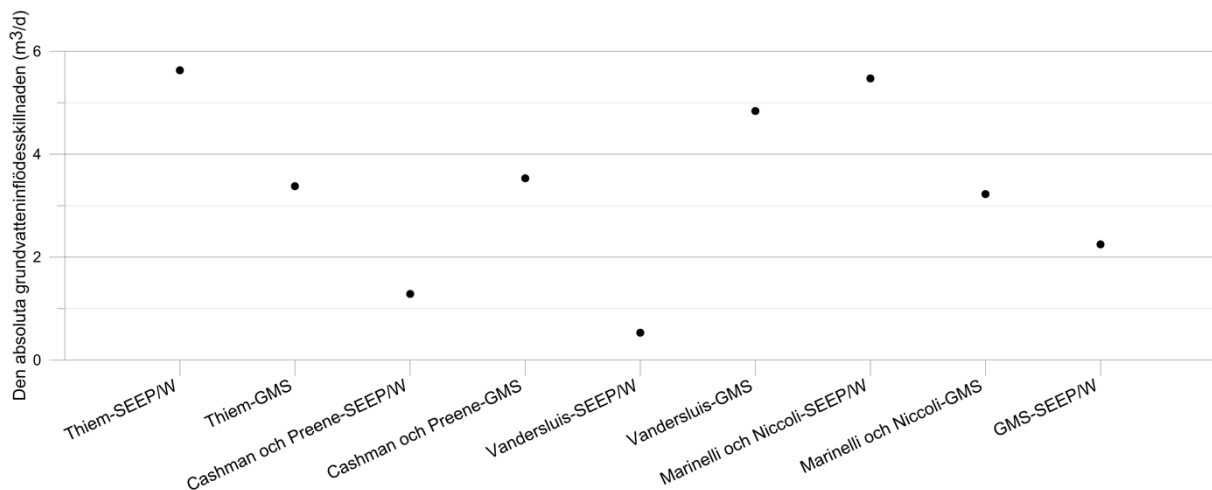


### 9.3 Jämförelse - numeriska och analytiska resultat

Nedan presenteras de två fallen med jämförelser mellan de analytiska metoderna och de numeriska. De beräknade influensområdena från de numeriska metoderna och den analytiska metoden har ritats in i modellytorna för att lättare kunna se hur lösningarna skiljer sig åt. Beräknade inflöden har plottats som den absoluta skillnaden i beräknat inflöde mellan de olika analytiska ekvationerna och de numeriska metoderna.

#### 9.3.1 Lorensborgsgatan

För jämförelsen med fallet Lorensborgsgatan (figur 35) finns den minsta skillnaden mellan Vandersluis och SEEP/W där endast 0,8 m<sup>3</sup>/d skiljer metodernas beräknade inflöden åt. Resterande skillnader mellan analytiska och numeriska beräkningar hamnar inom storleksintervallet 2-6 m<sup>3</sup>/d. Undantaget från figur 35 är värdena för SBEF vilka uppgick till 251 m<sup>3</sup>/d när jämfört med SEEP/W och 249 m<sup>3</sup>/d när jämfört med GMS. Skillnaderna mellan värdena för Lorensborgsgatan är relativt små vilket kan bero på de låga hydrauliska konduktiviteterna som finns i området. De stora värdena för SBEF beror troligtvis på ekvationens enkelhet och visar på att försiktighet bör vidtas vid användandet för att inte överskatta inflödet.



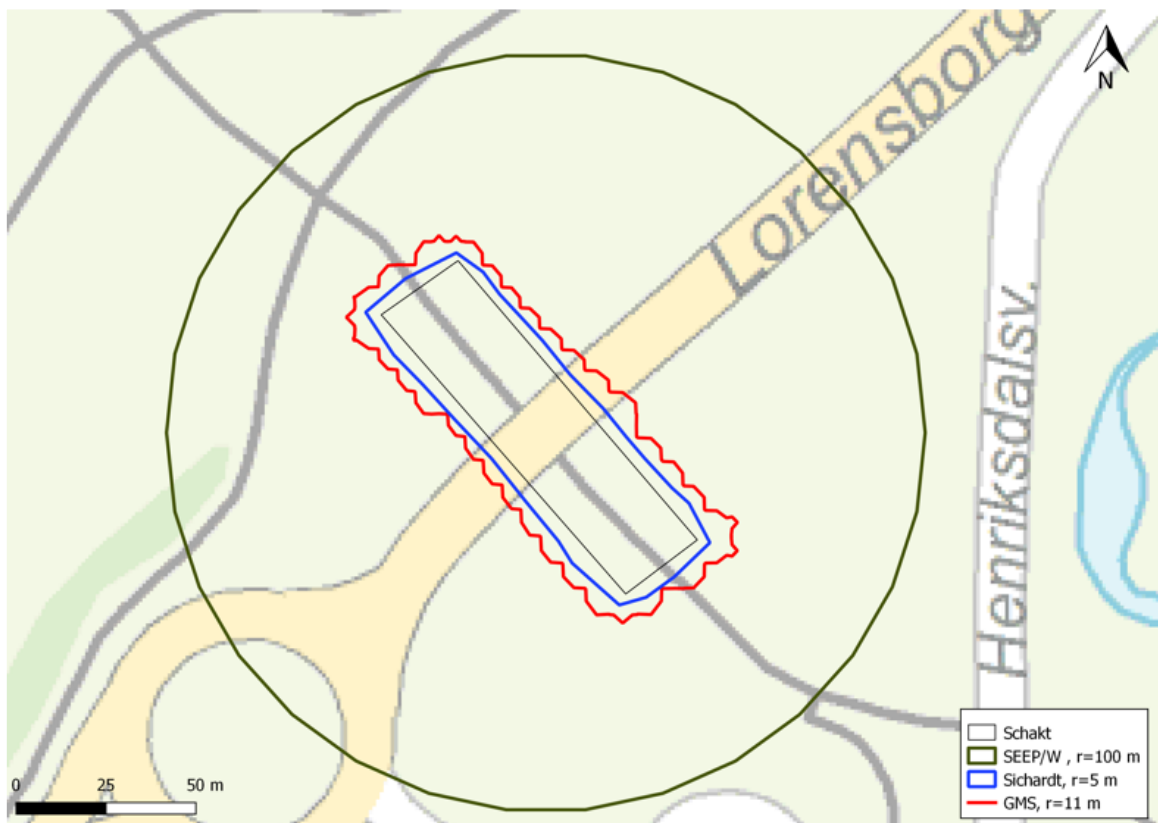
Figur 35. Skillnader i beräknat inflöde för varje analytisk metod jämförd med de numeriska för Lorensborgsgatan samt skillnaden mellan de två numeriska metoderna.

De beräknade influensområdena för Lorensborgsgatan visas i figur 36. Schaktets utformning syns med svart markering. Radierna skiljer sig åt men avstånden är små och störst radie bildar SEEP/W-modellen med avståndet 100 meter från schaktkanten. En förutsättning för användandet av den analytiska Sichardts ekvation är att omvandla schaktets area till arean av en cirkel och därifrån ta fram en ekvivalent brunnsradie. Eftersom modellen för Lorensborgsgatan är uppbyggt av material med låg hydraulisk konduktivitet så blir den beräknade radien liten i förhållande till schaktets storlek och görs en cirkel med denna radie hamnar delar av den cirkeln innanför schaktet.

De analytiska ekvationerna utgår från att det sker ett radiellt flöde in till schaktet vilket skapar problem när schaktet är stort och de omgivande geologiska materialen är förhållandevis täta. Den branta hydrauliska gradienten nära schaktet gör att avståndet från schaktets kant till

schaktets mittpunkt blir längre än den faktiska avsänkning som schaktet skapar. Subtraheras den ekvivalenta brunnsradien från influensradien för Sichardt fås en radie på ca 5 meter till ursprunglig grundvattenyta. Influensen som sker förväntas påverka schaktet lika mycket runt om hela schaktgränsen.

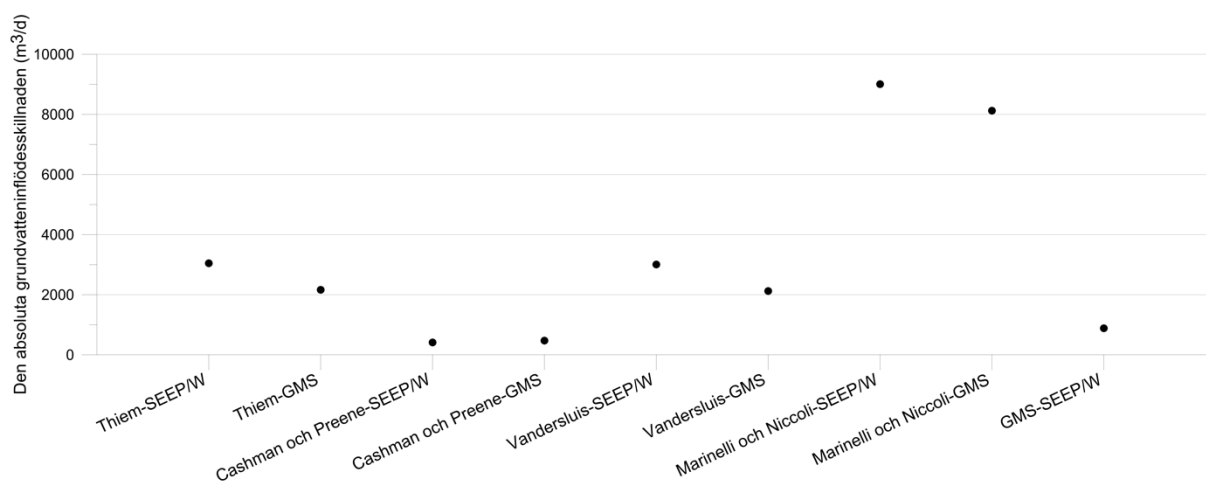
På samma sätt måste influensradien framräknad av SEEP/W tolkas när den ska passas in i modellområdet. Eftersom den tvådimensionella modellen endast visar en sida måste antagandet göras att radien sträcker sig lika långt åt motsatt håll samt lika långt åt kortsidornas håll. Eftersom den beräknade influensradien med SEEP/W är längre än schaktet antas ett cirkulärt influensområde.



Figur 36. Jämförelse mellan influensområden beräknade med tre olika metoder för Lorensborgsgatan.

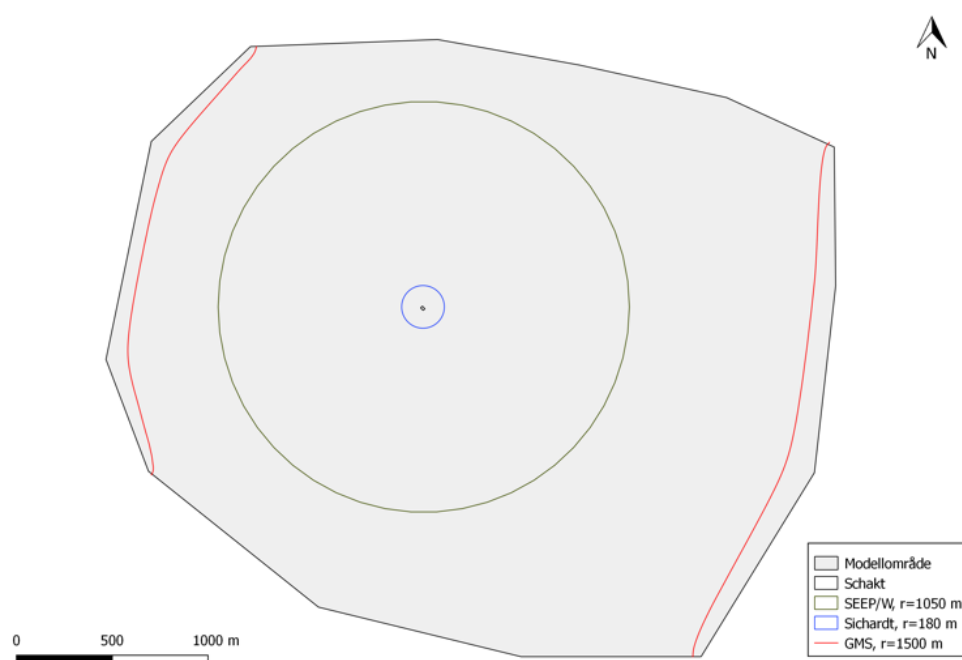
### 9.3.2 Teoretiskt fall

Skillnaden mellan värdena för de olika metodernas beräknade grundvatteninflöde presenteras i figur 37. Jämförelsen visar att värdeskillnaden hamnar vid storleksordningar runt 1000-10000 m<sup>3</sup>/d vilket är en stor volymmässig skillnad. Detta är en konsekvens av det genomsläppliga material som antas finnas i området vilket ger stora flöden. Grova förenklingar och antaganden gör också att SEEP/W beräknar ett lågt inflödesvärde vilket skapar stora skillnader när jämfört med de analytiska beräkningarna. Jämförelsen mellan SEEP/W och Cashman och Preene förhåller sig dock relativt nära varandra. Som kan ses i grafen skiljer sig GMS och SEEP/W sig åt med ca 1000 m<sup>3</sup>/d.



Figur 37. Skillnader i beräknat inflöde för varje analytisk metod jämförd med de numeriska för det teoretiska fallet.

Modellområdet och schaktet samt de beräknade influensområdena för det teoretiska fallet presenteras i figur 38. Influensområdet från GMS upptar nästan hela modellytan samt sträcker sig utanför modellen och ger den största radien på 1450 meter. Radien från Sichardt är betydligt mindre samtidigt som den antas ha en cirkelform. Även radien från SEEP/W är här antagen som en cirkel vilken underbyggs av att schaktet i området kan liknas vid en brunn med liten radie jämfört med den influensradie som skapas vilket medför att antagandet om radiellt flöde stämmer.



Figur 38. Jämförelse mellan beräknade influensområden för det teoretiska fallet.

Tabell 15 beskriver vilken typ av indata som krävs för de olika metoderna använda i detta arbete. De numeriska modellerna kräver mest indata och egenskaper och parametrar skulle kunna tillkomma. Detta eftersom modellernas områden har förenklats och indata för en del potentiellt viktiga randvillkor inte har kunnat användas. Sichardt beräknar endast ett influensområde vilket sedan har använts i resterande analytiska ekvationer medan SEEP/W och GMS både beräknar inflöde och influensområde. Betydligt färre parametrar behövs för de analytiska ekvationerna vilket är en konsekvens av deras förenklingar och bör resultera i grövre uppskattningar av inflödet. Resultaten visar på skillnader som kan påverkas av ekvationernas antaganden men också av de numeriska lösningarnas osäkra indata.

Tabell 15. Behov av indata samt vad som beräknas för vardera metod (inflöde och/eller influensområde).

Indata	SEEP/W	GMS	Thiem	Cashman och Preene	Vandersluis	Marinelli och Niccoli	SBEF	Sichardt
	Influensområde och inflöde		Inflöde					Influensområde
Hydraulisk konduktivitet	x	x	x	X	x	x	x	x
Avsänkt grundvattenyta	x	x	x	X	x	x	x	x
Schaktgeometri	x	x	x	X	x	x	x	x
Ekvivalent brunnsradie	x	x	x	X	x	x		
Influensradie			x	X	x	x		
Grundvattenbildning	x	x				x		
Konduktans	x	x						
Volym- komprimerbarhet	x							
Mättad vattenmängd	x							
Geologiska lager	x	x						
Föreskrivna grundvatten- potentialer	x	x						
Kalibreringsdata	x	x						
Valideringsdata	x	x						

Tabell 16 visar beräknade värden influensområde och inflöde för varje metod. De analytiska beräkningarna är gjorda med den hydrauliska konduktiviteten satt till  $10^{-7}$  m/s för Lorensborgsgatan och  $10^{-4}$  m/s för det teoretiska fallet.

Tabell 16. Beräknade värden av influensområde samt inflöde för varje metod.

Metod	Beräkningssätt	Lorensborgsgatan		Teoretiskt fall	
		Inflöde (m <sup>3</sup> /d)	Influensområde (m)	Inflöde (m <sup>3</sup> /d)	Influensområde (m)
SEEP/W	Numerisk	1,0	100,0	37,6	1050,0
GMS	Numerisk	3,3	11,0	922,6	1498,0
Metod	Beräkningssätt	Lorensborgsgatan		Teoretiskt fall	
		Inflöde (m <sup>3</sup> /d)	Influensområde (m)	Inflöde (m <sup>3</sup> /d)	Influensområde (m)
Sichardt	Analytisk		30,4		180
Thiem	Analytisk	6,7		3083,5	
Cashman och Preene	Analytisk	0,3		450,0	
Vandersluis	Analytisk	1,6		3044,8	
Marinelli och Niccoli	Analytisk	6,5		9045,2	
SBEF	Analytisk	251,9		311040	

#### 9.4 Numeriska modellförbättringar

Både modellerna i SEEP/W och GMS har genomgått känslighetsanalyser där det framgår vilka parametrar som ger störst påverkan på modellerna. De känsligaste parametrarna är viktiga att lägga stort fokus vid när det kommer till insamling av data. Samtidigt ställer det krav på att valda parametrar och randvillkor är korrekta och korrekt tolkade i den konceptuella modellen. Modellområdets storlek är en viktig simuleringsdel där både modellen i GMS och SEEP/W för Lorensborgsgatan och det teoretiska fallet kunde gjorts större. Eftersom influensområdet för det teoretiska fallet i GMS-modellen sträckte sig utanför området och fram till nollflödesgränserna påverkas resultaten för hur influensområdet ska se ut. Det är även tydligt att en påverkan sker från modellgränsen i SEEP/W eftersom ingen avplaning av avsänkningskurvan skedde vid förflyttning av randvillkoret. En vidare undersökning hade kunnat göras där man sträcker ut modellgränsen ännu längre men programmet upplevde redan vid längden 1050 meter en hög tidsåtgång vid konvergeringen eftersom antalet ekvationer som behövde lösas då hade ökat markant. Ett större område för Lorensborgsgatan hade ställt högre krav på indata i området där betydande in och utflöden för modellen hade behövt tas i beaktning vilket framförallt är viktigt när området ligger i eller nära en stad där grundvattnet förväntas vara påverkat från många håll.

Tillgången på data var begränsad vilket gjorde att modellerna fick grovt förenklas. Bland annat saknades topografi för området vilket hade gynnat GMS-modellen men haft en liten påverkan på SEEP/W-modellen eftersom den saknar moduler för att inkludera detaljerad topografi. Mer ingående platsspecifik data om områdets geologiska enheter och mäktigheter hade skapat mer realistiska modeller. Så pass specifik data är dock ofta svåråtkomlig och kräver områden som studerats mycket tidigare eller där pengar finns för att genomföra platsspecifika undersökningar. En bättre upplösning av dem geologiska lagerföljderna med fler variationer i hydrauliska parametrar hade gjort modellerna mer komplexa och möjligen speglat markens heterogenitet bättre. Tillgången på data begränsade också valideringssteget för SEEP/W modellen eftersom en godtycklig grundvattenyta ansåts som ett randvillkor. Det var därför bara möjligt att reproducera pumptestet och på så sätt försöka kalibrera modellen rätt utan att validera den. Både GMS och SEEP/W har nytta av fler observationspunkter som speglar grundvattennivåerna i området vilket kan leda till en bättre kalibrerad modell som återger mer korrekta hydrauliska flöden.

I SEEP/W upplevdes det svårt att anpassa den konceptuella modellen till en numerisk modell. Det användes inte någon infiltration i form av nederbörd i modellen på grund av de konvergeringsproblem som uppstod av randvillkoret samt de väldigt höga resulterande grundvattennivåer som skapades. Efter många försök gjordes bedömningen att modellerna skulle fungera bättre utan det ovanliggande randvillkoret för nederbördsinfiltration men modellerna hade möjligtvis kunnat kalibreras bättre om nederbörden hade tagits med.

Den föreskrivna grundvattenpotentialen som ansattes som ett randvillkor i SEEP/W hade kunnat simuleras med ett så kallat oändligt randvillkor vilket ska spegla en akvifer som har en oändlig utsträckning i positivt x-led. Detta hade kapat tidsåtgången vid modeller som behöver göras längre när man vet det konstanta vattentrycket. Eftersom väldigt lite var känt om hur detta randvillkor användes samtidigt som den avsatta tiden för modelleringen tog slut förbisågs randvillkoret.

## 9.5 Analytiska modellförbättringar

De analytiska ekvationerna är användbara på grund av deras förenklade struktur. Ekvationerna kan beskriva mer komplicerade problem men förlorar då i många fall den enkelhet och överskådlighet som gör dem användbara. Det går att göra förbättringar som påverkar deras resultat genom att ta med ytterligare parametrar i beräkningarna vilket skulle försvåra tolkningen men också ställa krav på ny indata.

Eftersom den hydrauliska konduktiviteten antas vara en viktig parameter för beräkningarna är framtagandet av dessa värden ytterst viktiga. Siktanalyser eller helst provpumpningar bör användas för att bestämma hydrauliska parametrar för det område man ämnar beskriva.

För exemplet Lorensborgsgatan spelar även tolkningen av konduktiviteten en stor roll eftersom det där förväntas att vatten strömmar upp från botten av schaktet vilket flera, undantaget Marinello och Niccoli, ekvationer inte tar i beaktning. Konduktiviteten alternativt transmissiviteten kan vid ett sådant tillfälle möjligen förändras för att skapa en bättre anpassning till situationen. Som dock noterades vid känslighetsanalysen så är ekvationerna mer känsliga för en ökad konduktivitet än en minskad vilket gör att förändringar i konduktiviteten bör göras med stor försiktighet så att inte orrealistiska inflödesvärden beräknas.

Eftersom endast en ekvation (Sichardt) användes för att beräkna influensområdet kan en minskad tilltro till det beräknade värdet möjligen uppstå. För Thiem och Vandersluis förekommer radien innanför en logaritmisk term vilket minskar påverkan av parametern. Dock finns radien inte inom en logaritmisk term i varken Cashman och Preene, Marinelli och Niccoli eller SBEF vilket gör att en alltför grovt uppskattad influensradie där skulle kunna påverka inflödet i betydande grad. Ytterligare känslighetsanalys skulle här kunna göras där man undersöker hur olika influensradier påverkar inflödet. I litteraturen hittades andra beräkningsmetoder för influensradie men flera av dem var liknande Sichardt i så stor utsträckning att de uteslöts.

SBEF är den minst sofistikerade metoden använd detta arbete och togs med just på grund av sin enkelhet och att den förekommer i litteraturen. Det är mycket tilltalande att med enkla medel beräkna fram ett inflöde men resultaten tyder på att SBEF beräknar ett grovt överskattat grundvatteninflöde vilket i praktiken skulle leda till alltför uppskalade och kostsamma avsänkingsåtgärder. Även om säkerhetsmarginaler tillkommer till de mer komplexa ekvationernas beräknade inflöden kommer inte värdena upp i storleksordningar likt de SBEF räknar fram.

## 9.6 Val av metod

För att avgöra vilken metod som bäst lämpar sig för inläckage och influensområdesberäkningar när det kommer till planskilda korsningar behöver en del aspekter vägas in tillsammans med de fördelar och nackdelar som varje metod har.

GMS MODFLOW har en klar fördel när det kommer till visualiseringen av både problemet, där den konceptuella uppbyggnaden görs i programmet, och lösningen. Avsänkningens utbredning kan tydligt studeras och visualiseras i varje vertikalt lager oberoende av vilken avsänkningstolerans som finns för området. Att se exakta gränsdragningar för influensområdet

kan varken göras med SEEP/W eller analytiska ekvationer vilket gör GMS fördelaktigt när det kommer till att beskriva områden med mer varierade geologiska och hydrauliska förutsättningar som till exempel vattendrag, horstar eller starka heterogeniteter.

GMS och SEEP/W har även fördelen att kunna simulera tidsberoende problem vilket kan behöva göras om långtidseffekter av komplexa akviferssystem med många inflödeskomponenter ska förklaras. Planskilda korsningar, där schakten ofta ligger ytligt belägna och där en relativt liten påverkan oftast väntas, behöver sällan den typen av modellering. Dock kan jämförelsen mellan förväntade inflöden till schakt belägna nära vattenskyddsområden eller liknande skyddsobjekt med hög konduktivitet och en tätare jordmassa med lägre konduktivitet likt Lorensborgsgatan visa att en långtidseffekt kan vara viktig att utreda. Kalibrerings- och valideringsenkelheten för modelleringsfall som planskilda korsningar gör också att GMS snabbare kan återskapa grundvattenförhållanden som återspeglar verkligheten till en högre grad, i jämförelse med SEEP/W där kalibreringen kräver fler modelleringsstekniska kunskaper eftersom det där inte finns färdiga moduler som går att använda.

SEEP/W var ett svårt program att hantera när det kom till öppna akviferer och framförallt för simulering av provpumpningar. Arbetet med SEEP/W tog därför lång tid och krävde en del support från företagets experter. Kalibrering genom att återskapa en provpumpning i en öppen akvifer med SEEP/W kan troligtvis göras på ett bättre sätt och med ett bättre resultat men tidsaspekten för examensarbetet spelade in i det här fallet. Eftersom en grundvattenyta bestäms genom föreskrivna potentialer eller genom en fix nivå före en dynamisk körning kunde inte en ursprunglig grundvattenyta kalibreras. Därför kunde inte heller den tillgängliga informationen för Lorensborgsgatans grundvattennivåer användas och det gick inte att validera modellen. Mer indata hade behövts i det här fallet där exempelvis årliga grundvattenmätningar kunde användas för att validera modellen.

Analytiska ekvationers enkelhet gör dem mycket tilltalande när snabba uppskattningar ska göra angående storleksordningar rörande influensområdet vid schaktning för planskilda korsningar. Modeller som GMS och SEEP/W bygger på liknande ekvationer vilket bör vara en förklaring till varför skillnaden i inflöde inte är så stor. Dock kan stora skillnader observeras vid analytiska beräkningar för det teoretiska fallet vilket tyder på att grova förenklingar och brist på indata har skapat orealistiska värden. Som framgick i känslighetsanalysen reagerar flera av ekvationerna starkt på en förhöjd hydraulisk konduktivitet medan en minskad ger ett mindre utslag. För att inte beräkna orealistiska inflöden bör konduktiviteten därför bestämmas med hög noggrannhet. De höga grundvatteninflöden som beräknades för det teoretiska fallet beror till stor del på de genomsläppliga material som antas finnas i området och att området är homogent och isotropt vilket är en förenkling jämfört med de numeriska modellerna.

För att välja rätt metod vid rätt tillfälle måste en rad aspekter tas i beaktning. Processen för schaktning av planskilda korsningar kräver att grundvatteninflödet och influensområdet bestäms i tidiga stadier av projekten när få undersökningar har gjorts och begränsat med indata finns tillgängligt. Projekten är också ekonomiskt och tidsmässigt pressade vilket skapar ytterligare krav på metodvalet. Ett angreppssätt för att motivera ett visst val är att den enklaste



metoden väljs vilken sedan utvärderas när det kommer till projektets kriterier där kriterierna bestäms genom att diskutera vilka typer av skyddsvärden, både miljömässiga och strukturmässiga, området har. Det kan även handla om att framtidsscenarioer behöver åskådliggöras eller om det räcker med att se på en stationär situation. Projektets kriterier ger en uppfattning om huruvida metoden överhuvudtaget kommer kunna ge de svar man söker. Uppfylls inte kriterierna för projektet väljs den näst enklaste metoden och en ny utvärdering görs. När en metod uppfyllt kriterierna behöver tillgänglig indata undersökas. Den valda metoden kan behöva mer information än vad som finns tillgänglig och då måste fler undersökningar göras vilket kan bli kostsamt. Finns det tillräckligt med information för vad metoden kräver kan man gå vidare med den lösning som ges.

I processen beskriven ovan finns två stora osäkerheter som måste tas i beaktning. Först och främst finns en osäkerhet i om metoden bygger på korrekta antaganden och att den är anpassad till den situation man ämnar beskriva. Ett exempel kan vara att en analytisk ekvation, som räknar ut grundvatteninflödet till en brunn där brunnen antas vara oändligt liten, används för att beräkna inflödet till ett schakt med en area på  $2000 \text{ m}^2$ . Den andra osäkerheten uppkommer vid användandet av tillgänglig indata och hur den är framtagen. Mätningar och provtagningar bör vara gjorda i samband med genomförandet av projektet av personer med god kunskap i ämnet som själva analyserat provresultaten och kan bedöma dess rimlighet. Är äldre indata använd eller hämtad utan vetskap om provtagningstider och använd av personer utan tillräcklig kunskap inom ämnet kan det i slutändan resultera i felaktiga modellresultat, oavsett om numeriska eller analytiska modeller har använts.

## 10 Slutsatser och rekommendationer

Resultaten från jämförelsen mellan de analytiska och numeriska ekvationerna visar att områden med högre hydraulisk konduktivitet ger osäkerheter i inflöde med större spridning och i en högre storleksordning än områden med lägre konduktivitet. Skillnaderna mellan beräknade värden för lägre konduktivitet ligger mellan ca 0,25 och 6 m<sup>3</sup>/d medan de för högre konduktivitet hamnar mellan 37 och 9000 m<sup>3</sup>/d. Detta medför att konsekvenserna för avsänkningens utformning kan bli stora om ett schakt planeras i mer genomsläppliga material och därför bör också högre krav ställas på beräkningsnoggrannheten i sådana områden. Det kan därför vara fördelaktigt att skapa en mer detaljerad numerisk modell i GMS som kan återge ett mer exakt inflöde.

Resultaten för jämförelsen mellan influensområdesberäkningarna visar att områden med högre hydraulisk konduktivitet ger betydligt större influensområde. Detta medför att mer exakta influensområden bör beräknas för de områden där avsänkningen förväntas innefatta eller angränsa till känsliga skyddsobjekt. För att visa på hela influensområdet behöver modellen omfatta ett område stort nog så att influensområdet inte påverkas av modellgränserna.

För både Lorensborgsgatan och det teoretiska fallet bedöms arbetssättet för beräkningarna med SEEP/W vara komplicerat och rekommenderas inte för beräkningar av fall för planskilda korsningar. För den som har mycket god kunskap om SEEP/W skulle programmet möjligen kunnat fungera mer effektivt så att infiltrationen från regn kunde simulerats samt att modellen kunde kalibrerats och validerats på ett bättre sätt.

Arbetssättet för GMS anses bra och lätt att förstå och bör användas vid numeriska beräkningar för planskilda korsningar. GMS utformning möjliggör att utvärderingen med kalibrering och validering sker snabbt och effektivt. Dock kräver GMS mycket indata och bör inte användas när information om områdets randvillkor eller geologiska egenskaper inte är omfattande. Ska GMS användas till planskilda korsningar måste uppgiften motivera den tidsåtgång som krävs för att samla data och skapa en väl fungerande modell.

En analytisk lösning bör användas framför en numerisk vid situationer då inga ytterligare krav på lösningen ställs, exempelvis framtidsscenario, eller där komplicerade hydrauliska förhållanden råder såsom akviferer med stark heterogenitet eller då påverkan sker från flera uttagsbrunnar samtidigt. För fall där de hydrauliska parametrarna visar på täta förhållanden kan analytiska ekvationer ge snabba och godtagbara lösningar.

Eftersom inga verkligt uppmätta inflöden och influensområden fanns tillgängliga kan inga klara metodrekommendationer göras. Däremot är det kostnadsmässigt och tidsmässigt motiverat att en iterativ metodvalsprocess tillämpas för projekt av detta slag där den enklaste metoden först väljs och utvärderas i förhållande till projektets kriterier. Kriterierna ger sedan en uppfattning huruvida metoden är lämplig för att lösa problemet eller inte. Uppfylls inte kriterierna bör en mer sofistikerad metod väljas vilken i sin tur utvärderas. Detta medför att den metoden man väljer aldrig blir mer avancerad än vad som faktiskt behövs.

## Referenslista

Anderson, M, & Woessner, W (1992), Applied Groundwater Modeling : Simulation Of Flow And Advective Transport, n.p.: Academic Press Inc ; San Diego, 1992, Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost.

Aryafar, A., F. Doulati Ardejani, & R. N. Singh. "Numerical modeling of groundwater inflow from a confined aquifer into Sangan open pit mine, northeast Iran." Geomechanics and Geoengineering: An International Journal 4.3 (2009): 189-199 [Hämtad 11 april 2017].

Aquaveo (2017). XMS Wiki online hjälp för GMS, SMS and WMS. GMS – Automated parameter estimation. [http://www.xmswiki.com/wiki/GMS:Automated\\_Parameter\\_Estimation](http://www.xmswiki.com/wiki/GMS:Automated_Parameter_Estimation) [Hämtad 11 maj 2017].

Broaddus, Matthew R. Performing a Steady-state Seepage Analysis Using SEEP/W: A Primer for Engineering Students. Diss. University of Louisville, (2015). [Hämtad 18 Apr 2017].

Cashman, P, & Preene, M 2013, Groundwater Lowering In Construction. [Electronic Resource] : A Practical Guide To Dewatering, n.p.: Boca Raton, Fla. : Taylor & Francis, (2013)., Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost.

Domenico, P. A. & Schwartz, F. W., (1998). Physical and Chemical Hydrogeology, 2:a upplagan, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Fetter, CW (2014), Applied Hydrogeology, n.p.: Essex Pearson Education cop. (2014), Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost.

Fossen, H (2010), Structural Geology, n.p.: Cambridge : Cambridge University Press, (2010), Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost.

Geo-slope International Limited (2012a). Seepage modeling with SEEP/W, an engineering methodology. July 2012 edition.  
<<http://downloads.geoslope.com/geostudioresources/8/0/6/books/seep%20modeling.pdf?v=8.0.7.6129>> [Hämtad 11 Maj 2017].

Geo-slope International Limited (2012b). SEEPW Software Package for finite element seepage analysis. <<http://secure.geo-slope.com/res/info8/SEEPW2012.pdf>> [Hämtad 20 Apr 2017].

Groundwater Modeling System, Version 10.1, Reference Manual, <<http://www.xmswiki.com/wiki/GMS:GMS>>, Aquaveo, LLC, Provo, Utah, (2016). [Hämtad 27 april 2017].

Gustafson, G., (2009). Hydrogeologi för bergbyggare, Forskningsrådet Formas, Stockholm. ISBN 978-91-540-6029-0.

Malmö Stad, Gatukontoret (2010). <<http://malmo.se/download/18.29c3b78a132728ecb5280005320/1491305611382/Beslut+natu+reservatsbildande+kalkbrottet.pdf>> [Hämtad 10 maj 2017].

Marinelli, Fred, & Walter L. Niccoli. "Simple analytical equations for estimating ground water inflow to a mine pit." Ground Water 38.2 (2000): 311.

McDonald, M.G., & A.W. Harbaugh. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, Book 6, Chapter A1, 586. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. Reston, Virginia: USGS.

Moberg & Skagersjö (2004). Jan Moberg, Vägverket, Bengt Skagersjö, Svenska Kommunförbundet (2004). Vägar och gators utformning, VGU. ISSN: 14019612  
<[http://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga\\_och\\_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument\\_vag\\_och\\_gatuutformning/Vagar\\_och\\_gators\\_utformning/Korsningar/korsningar.pdf](http://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga_och_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument_vag_och_gatuutformning/Vagar_och_gators_utformning/Korsningar/korsningar.pdf)> [Hämtad 10 maj 2017].

Molarius, R (1996), Modeling Groundwater Flow And Contaminant Transport In Soils, n.p.: Espoo : Technical Research Centre of Finland, 1996, Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost.

Powers, JP (2007), Construction Dewatering And Groundwater Control : New Methods And Applications, n.p.: Hoboken, N.J. : Wiley, ©2007., Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost.

SGU (2017). Projekt kring bedömning av påverkansområden från schakter och dagbrott - Presentation vid Bergmaterialrådet Björn Holgersson, SGU Uppsala 16/2 2017. [Hämtad 5 aug 2017].

SMHI, (2015). Nederbörds- och temperaturdata från klimatdata [e-resurs] Tillgänglig från: <<http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/kartor/monYrTable.php?par=nbYr>> [Hämtad 15 aug 2017]

Svenska byggnadsentreprenörföreningen, SBEF. (2009). Länshållning vid schaktarbeten (5 uppl). Linköping: Statens Geotekniska Institut.

Sweco (2000). Lorensborgsgatan grundvattenundersökning (2000). Larsåke Sundström, Daniel Sevelin och Jan Lindberg. Uppdragsnummer: 1290069100 på uppdrag för Malmö stad.

Thiem G (1906) Hydrologische methoden [Hydrological methods]. PhD Thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.

Tügel, F, Houben, G, & Graf, T, (2016). 'How appropriate is the Thiem equation for describing groundwater flow to actual wells?', Hydrogeology Journal, 24, 8, pp. 2093-2101, Academic Search Complete, EBSCOhost, [Hämtad 28 April 2017].

Vandersluis, G. D., V. Straskraba, & S. A. Effner, (1995) "Hydrogeological and geochemical aspects of lakes forming in abandoned open pit mines." Water Resources at Risk, 162 177.

Wall, Henrik, & Jonas Andersson, (1999) "Skattning av en akvifers hydrauliska egenskaper med stokastisk FEM. Med exempel från Malmöområdet." [Hämtad 9 maj 2017].

Wiberg, N (1981), Finita Elementmetoden : En Datoranpassad Beräkningsmetod För Ingenjörproblem = [The Finite Element Method] : [A Computer Method For Engineering Problems], n.p.: Malmö : LiberLäromedel, 1981 ; (Stockholm : LiberTryck), Library catalogue (Lovisa), EBSCOhost, [Hämtad 13 April 2017].

Zaidel, Jacob, Bradley Markham, and David Bleiker. "Simulating seepage into mine shafts and tunnels with MODFLOW." Ground water 48.3 (2010): 390-400. [Hämtad 2 maj 2017].

## Appendix: Kalibreringsdata och valideringsdata för Lorensborgsgatan.

Tabell 17. Kalibreringsdata

<b>Brunn</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>GV-nivå (m)</b>
UB	371662	6159338	12.5
9901B	371659	6159348	12.48
9902B	371651	6159286	12.9
9903B	371596	6159460	12.46
9901J	371770	6159163	13.76
9902J	371568	6159317	12.97
9903J	371618	6159459	12.63
RO39	371602	6159385	12.58
G1	371629	6159549	11.95
B1	371586	6159608	11.95
33	371573	6159812	13.14
42	372000	6159850	14
234	370542	6158690	12.47

*System i plan: Sweref 99 TM*

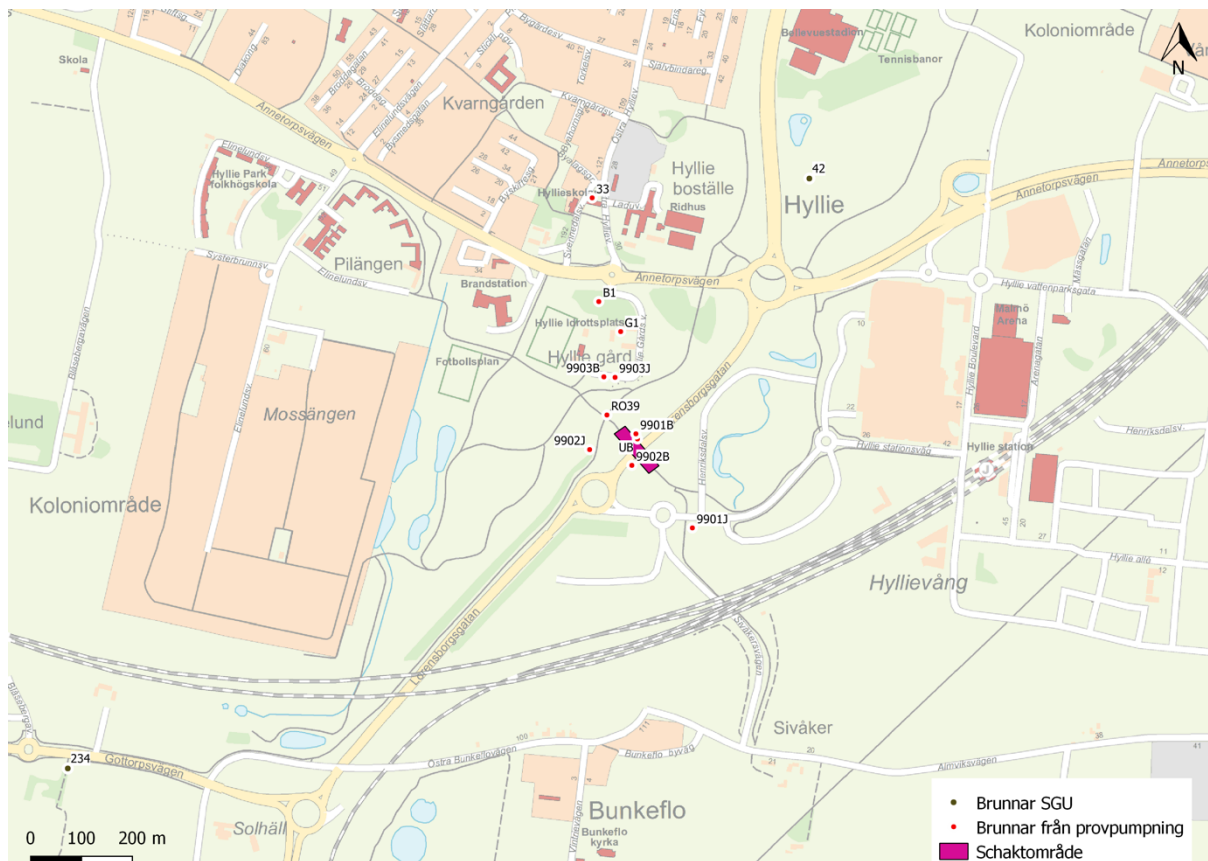
*System i höjd: RH70*

Tabell 18. Valideringsdata

<b>Brunn</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>GV-nivå (m)</b>
UB	371662	6159338	6.85
9901B	371659	6159348	10.99
9902B	371651	6159286	11.96
9903B	371596	6159460	11.31
9901J	371770	6159163	13.47
9902J	371568	6159317	12.06
9903J	371618	6159459	11.57
RO39	371602	6159385	11.41
G1	371629	6159549	11.33
B1	371586	6159608	11.32
33	371573	6159812	12.79

*System i plan: Sweref 99 TM*

*System i höjd: RH70*



Figur 39. Observationsbrunnar och deras geografiska läge för Lorensborgsgatan.

Tabell 19. Parameter och randvillkorsförändringar efter före och efter kalibrering av GMS-modell för Lorensborgsgatan.

Parameter	Enhet	Värde före kalibrering	Värde efter kalibrering
Horisontell K övre morän	m/s	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-7}$
Horisontell K undre morän	m/s	$1,00 \times 10^{-8}$	$1,16 \times 10^{-8}$
Horisontell K kalkberg	m/s	$4,35 \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-5}$
Vertikal K övre morän	m/s	$1,09 \times 10^{-8}$	$3,33 \times 10^{-8}$
Vertikal K undre morän	m/s	$1,09 \times 10^{-8}$	$3,33 \times 10^{-9}$
Vertikal K kalkberg	m/s	$5,00 \times 10^{-10}$	$1,90 \times 10^{-5}$
Infiltration	m/d	0,0005	0.00025
Föreskriven grundvattenpotential öst	m (RH70)	13,6	13,6
Föreskriven grundvattenpotential väst	m (RH70)	12,2	12
Mäktighet moränlager	m	10	10
Mäktighet kalkberg	m	24	24