



CHALMERS

Analys av sättningar vid vattenutvinning ur sluten akvifer

Modellering med geostudio

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

Ella Sjöberg
Bao Kha Tran

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Analys av sättningar vid vattenutvinning ur sluten akvifer

Modellering med GeoStudio

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

ELLA SJÖBERG

BAO KHA TRAN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2024

Analys av sättningar vid vattenutvinning ur sluten akvifer

Modellering med GeoStudio

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

ELLA SJÖBERG

BAO KHA TRAN

© ELLA SJÖBERG, BAO KHA TRAN, 2024

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2024

Analys av sättningar vid vattenutvinning ur sluten akvifer
Modellering med GeoStudio

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

ELLA SJÖBERG

BAO KHA TRAN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Att utvinna vatten ur marken är en av anledningarna till att grundvattennivån i marken sjunker. Som en följd av detta uppstår sättningar som kan orsaka stora skador på bland annat vägar och byggnader. I det här arbetet ligger fokus på vattenutvinning genom pumpning ur en sluten akvifer. I programmet GeoStudio 2020 har en enklare modell av verkligheten skapats för att analysera sättningarna som uppstår vid en grundvattensänkning.

Markens förhållanden och egenskaper spelar stor roll för hur mycket grundvattennivån kommer att sjunka och sättningarnas storlek. Jordlagrens elasticitetsmodul är avgörande för sättningens storlek. Resultatet visar att en högre elasticitetsmodul leder till mindre sättningar. Att utvinna vatten med en hög pumphastighet innebär höga grundvattensänkningar och stora sättningar. I Göteborg används idag en pumphastighet på 100-1000 l/h för de flesta brunnar vilket är en relativt låg hastighet som inte kommer orsaka några större sättningar och skador. Men för att vara på den säkra sidan kan det vara värt att använda sig av markförstärknings- eller grundläggningsmetoder på platser där marken är extra känslig för sättningar.

Nyckelord: Grundvattensänkning, sättningar, vattenutvinning, akvifer, GeoStudio

Analysis of subsidence due to water extraction in confined aquifer
Modelling with GeoStudio

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

ELLA SJÖBERG

BAO KHA TRAN

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of geology and geotechnics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

One of the main reasons for land subsidence is the decrease in groundwater level, which is often caused by an excessive water withdrawal. Land subsidence is known for having a large negative effect on buildings and roads. The work is mainly focused on water withdrawal in a confined aquifer. With the help of GeoStudio, a geotechnical analysis software, a general model of a soil layer has been created and analyzed with regard to land subsidence due to water extraction.

The ground conditions play an important role in determining how much the groundwater level will decrease and the size of the subsidence. The E-modul of the soil layers also affect the size of the subsidence. The result shows that a higher modulus of elasticity leads to smaller ground settlement. Extracting water with a large pumping rate results in big groundwater drawdowns and subsidence. The common pumping rate in Gothenburg is 100-1000 l/h for wells in Gothenburg, which is considered relatively low and has no huge impact on settlement and buildings. However, to be on the safe side, it is advantageous to implement ground settlement prevention methods in places where the soil is extra sensitive to subsidence.

Key words: Groundwater drawdown, subsidence, water extraction, aquifer, GeoStudio

Innehåll

1. Inledning	1
1.1. Bakgrund	1
1.2. Syfte	1
1.3. Frågeställning	1
1.4. Avgränsningar	2
2. Teori	3
2.1. Grundvatten och porvattentryck	3
2.2. Akvifer	3
2.3. Theis Solution	3
2.4. Sättningar	5
2.5. Markförhållanden/Materialegenskaper	6
2.5.1. Friktionsjord	6
2.5.2. Kohesionsjord	6
2.6. Geologi och hydrologi i Göteborg	7
2.6.1. Jordartsgeologi	7
2.6.2. Hydraulisk konduktivitet	7
2.6.3. Elasticitetsmodul	8
2.6.4. Grundvattennivå	8
2.6.5. Brunnar	8
3. Metod	9
3.1. GeoStudio	9
3.1.1. SEEP/W	9
3.1.2. SIGMA/W	9
3.2. GeoStudio modell	9
3.3. In-situ analys	10
3.4. Analys av grundvattenflöde	11
3.5. Sättningsanalys	12
4. Resultat	14
4.1. Analys 1	14
4.1.1. Resultat av grundvattensänkning	14
4.1.2. Resultat av sättningar	16
4.2. Indatans påverkan på resultatet	16
4.2.1. Analys 2 - Standardpumphastighet i Göteborg	16
4.2.2. Analys 3 - Sättningskrav	17
4.2.3. Analys 4 - Elasticitetsmodul	19
5. Diskussion	20
6. Effekter och åtgärder	22
7. Slutsats	24
8. Referenser	25

9. Bilagor	28
9.1. Jordlagerföljd	28
9.2. Grundvattennivå i Göteborg	29
9.3. Sammanställning av parametrar för analys 1-4	30

Förord

Vi vill tacka vår handledare Ayman Abed från Chalmers Tekniska Högskola som hjälpt oss med allt från ett förslag till ett färdigställt arbete. Ayman är mycket kompetent inom området och har bidragit med värdefull hjälp genom arbetets gång. Sedan vill vi också passa på att tacka våra opponenter Alva Sellgren och Ebba Muren för bra feedback på vårt arbete.

Göteborg maj 2024

Ella Sjöberg

Bao Kha Tran

Beteckningar

q	Vattenflöde
k	Permeabilitet
A	Tvårsnittetsarea
i	Hydraulisk gradient
T	Transmissivitet
S	Storativitet
Q	Pumphastighet
h_0	Initial grundvattennivå
h	Grundvattennivå
$W(u)$	Brunnens ekvation
r	Avståndet från brunn
t	Pumpningstid
K	Hydraulisk konduktivitet
b	Akviferens mäktighet
σ_0	Initialspänning
σ'_0	Initial effektivspänning
γ	Tunghet
γ_w	Vattnets tunghet
z	Djup under markytan
u	Porvattentryck
E	Elasticitetsmodul
ν	Poissons tal
n	Porositet
κ	Kompressibilitet

1. Inledning

I detta avsnitt beskrivs bakgrund och syfte samt några frågeställningar som ligger till grund för arbetet.

1.1. Bakgrund

Antalet människor på vår planet ökar för varje år som går och likaså gör behovet av rent vatten (Sydvatten, 2023). En akvifer är en geologisk formation som lagrar grundvatten och har hög genomsläpplighet vilket gör det möjligt att utvinna grundvattnet i användbara mängder (SGU, 1994). Utvinning av vatten ur mark är en anledning till att grundvattennivån sjunker och porvattentrycket minskar. Detta leder i sin tur till att marken sjunker ihop nedåt och så kallade sättningar uppstår som kan orsaka stora skador på till exempel byggnader i området. År 1999 kom U.S. Geological Survey (USGS) med en rapport som visade att mer än 80 procent av sättningarna i USA berodde på den mänskliga utvinningen av grundvatten (USGS, 2000). I och med att samhället kommer behöva utvinna mer vatten för att försörja hela jordens befolkning kan dessa sättningar komma till att bli ett stort problem i framtiden.

För att förhindra sättningar och minska risken för skador på byggnader är det viktigt att veta hur mycket grundvatten som kan utvinnas från en akvifer utan att alltför stora sättningar uppstår.

1.2. Syfte

Studien går ut på att undersöka effekterna av att porvattentrycket minskar i en sluten akvifer. En analys ska göras för att visa hur grundvattensänkningar påverkar efterföljande sättningar i jordlager ovanför akviferen.

Huvudmålet med den här studien är att ge den senaste kunskapen om detta ämne och de metoder som används för att närma sig det. Rekommenderade åtgärder tas också fram för att kunna förebygga, minska samt kontrollera sättningar och påföljande skador.

För att uppnå syftet kommer en simulering göras i datorprogrammet GeoStudio 2020 där programmet SEEP/W kombineras med SIGMA/W. Anledningen till att båda programmen används är att SEEP/W endast kan simulera och kalkylera vattenflöden och inte deformationer medan SIGMA/W kan beräkna sättningar.

1.3. Frågeställning

- Hur kommer grundvattensänkningar att påverka sättningarna och dess storlek?
- Hur påverkas resultatet av olika förhållanden och parametrar?
- Vilka effekter kan grundvattensänkningar och sättningar få samt vad finns det för åtgärder?

1.4. Avgränsningar

Det finns flera anledningar till att grundvattenytan sjunker men fokuset i den här analysen kommer att ligga på vattenutvinning ur en brunn från en sluten akvifer.

Fokus kommer också att ligga på svenska förhållanden med markegenskaper och parametrar tagna från Göteborgsområdet.

Modellen som används i Geostudio för den här studien är generell och enkel. Marken i Göteborg består av många olika jordlager med olika mäktighet. Att inkludera alla dessa jordlager i modellen ansågs bli för tidskrävande och därför har en grov förenkling gjorts i jordlagerföljden.

2. Teori

I detta kapitel beskrivs den teori som behövs för att få en enklare förståelse för arbetet.

2.1. Grundvatten och porvattentryck

Jordens vatten är alltid i ständig rörelse i något som kallas för vattnets kretslopp. Den nederbörd som inte avdunstar upp i atmosfären igen infiltreras istället ner i marken genom en process som kallas perkolation (SMHI, 2009). Vattnet i marken bildar grundvatten som sedan antingen rinner ut i vattendrag eller utvinns för hushållsanvändning.

Grundvattenförhållandena och dess nivå varierar och påverkas av bland annat klimat, geologi, stratigrafi och mänsklig påverkan (Tremblay, 1990).

Jord består av korn, vatten och gas. Kornen bär lasterna som appliceras på jorden och emellan finns porer, alltså tomrum, som vattnet lägger sig i och det bildas porvattentryck. Hur porvattentrycket fördelas i jorden beror på många olika faktorer men den enklaste fördelningen kallas hydrostatisk portrycksfördelning som bygger på att trycket ökar linjärt med djupet (Tremblay, 1990). Vid exempelvis infiltration och pumpning så börjar vattnet att strömma i jorden och porvattentrycket är inte längre hydrostatiskt utan tillståndet kallas istället hydrodynamiskt. Vattenflödet q kan då beräknas med Darcys lag enligt ekvation (1)

$$q = k \cdot A \cdot i \quad (1)$$

där k är jordens permeabilitet, A är tvärsnittsarean och i den hydrauliska gradienten.

2.2. Akvifer

En akvifer är en geologisk formation under markytan som innehåller utvinningsbart grundvatten (SGU, 2023a). När vatten ska utvinnas ur en brunn i en akvifer så kommer grundvattenytan sjunka koncentriskt kring uttagspunkten (NE, u.å.a). Akviferens vattenledningsförmåga har betydelse för hur grundvattensänkningen kommer att se ut. En hög vattenledningsförmåga leder till att avsänkningen blir liten nära brunnen men sträcker sig långt från brunnen och vid en låg vattenledningsförmåga blir den stor men minskar snabbt (NE, u.å.a).

Det finns två vanliga typer av akviferer, öppen och sluten akvifer. I en öppen akvifer är vattenmagasinet direkt i kontakt med jordytan och är lättillgänglig. I en sluten akvifer är grundvattnet i magasinet inneslutet från jordytan av ett ogenomtränglig jordlager (Sundström, 2019), även kallad för akvifug (NE, u.å.b).

2.3. Theis Solution

Charles Vernon Theis utvecklade år 1935 en analytisk lösning för att uppskatta en grundvattensänkning orsakad av icke stationärt flöde från en sluten horisontell akvifer till en brunn (Theis, 1935). Om akviferens egenskaper T (transmissivitet), S

(storativitet) och Q (pumphastighet) är givna är det möjligt att beräkna grundvattensänkningen på ett visst avstånd en viss tid efter att pumpningen startat.

Grundvattensänkningen $h_0 - h$ beräknas med ekvation (2), (3) och (4), även kallad Theis Solution.

$$(h_0 - h) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

där $W(u)$ är brunnens ekvation

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = -0.577216 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2!2} + \frac{u^3}{3!3} - \frac{u^4}{4!4} + \dots \quad (3)$$

och

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4)$$

där r är avståndet från brunnen, S är akviferens storativitet och t är pumpningstiden.

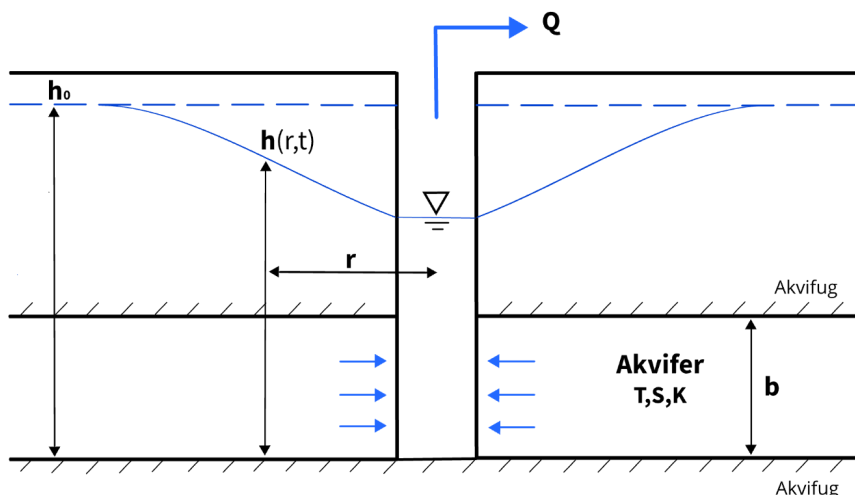
Transmissivitet, T , är ett mått på ett jordlagers förmåga att leda grundvatten och kan beräknas med ekvation (5).

$$T = K \cdot b \quad (5)$$

där K är ett jordmaterials hydrauliska konduktivitet, ett mått på mängden vatten som kan passera genom jorden på en viss tid, och b är jordlagrets mäktighet.

Storativitet S är ett mått på akviferens förmåga att avge vatten när grundvattennivån ändras.

Se figur 1 för att få en bild över hur grundvattennivån kommer att variera på olika avstånd från en brunn som pumpar vatten ur en sluten akvifer.



Figur 1 Pumpning ur en sluten akvifer

2.4. Sättningar

När jordlager komprimeras så sjunker markytan och det bildas något som kallas sättningar. Sättningar uppstår vanligtvis genom att marken belastas av någonting som exempelvis en byggnad eller som i detta arbete, att grundvattenytan sänks (SGU, u.å.a).

I jorden uppstår tryckspänningar i både vertikal- och horisontalled som är orsakade av ovanliggande jordlager (Sällfors, 2013). De vertikala spänningarna är viktigast vid sättningar och kallas även för totalspänning och betecknas σ_0 . Totalspänningen är beroende av jordens tunghet (γ), som även är ett mått på jordens densitet och ökar med djupet (z) enligt ekvation (6).

$$\sigma_0 = \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot z_i \quad (6)$$

Effektivspänning, σ'_0 , kallas den spänning som kornen utsätts för. Portrycket, u , är den spänning som överförs via porvattnet. Tillsammans bildar dessa två totalspänningen enligt ekvation (7).

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u \quad (7)$$

Som tidigare nämnt är porvattentrycket hydrostatiskt och kan beräknas för ett viss djup z enligt ekvation (8).

$$u = \gamma_w \cdot z \quad (8)$$

Vid en grundvattennivåsänkning så kommer kornen i jorden vid området där grundvattensänkning skett att ta upp alla tryckspänningar.

I Sverige finns det lite olika sättningskrav beroende på om det gäller byggnader, vägar eller järnvägar. Det finns rekommendationer från Boverket för byggnader, att sättningen inte får överstiga $L/500$. Alltså den totala längden på byggnaden dividerat med 500 (Rovapalo, 2009). Det går även att följa Eurokods (Europas dimensioneringsregler för bärverk) sättningsrekommendationer, där den totala sättningen för en normal konstruktion inte får överskrida 50 mm. Kravet kan variera beroende på typen av byggnad, markförhållanden eller om sättningen har någon negativ påverkan på konstruktionens funktion. Definitionen för en normal konstruktion enligt Eurokod är en byggnad med ett stomsystem och som har bärande väggar (Bond m.fl., u.å.)

2.5. Markförhållanden/Materialegenskaper

Vilken typ av jord marken består av har en stor inverkan på sättningen. Jordtyp påverkar markens porositet, permeabilitet och dräneringstid (Faryabi, 2023). Mark som mestadels består av grovkornigt material, såsom grus och sand, är mer resistent mot sättningar. Mark som är av finkornig jord och dåligt kompakterad sand kommer få större sättningar (Adiyaman & Budhu, 2012; SGI, 2023a). Jordarter kan delas in i två olika typer, friktionsjord och kohesionsjord.

2.5.1. Friktionsjord

Friktionskraften är den primära kraften som sammanhåller jordpartiklarna. Grovkornig jord och sand är exempel på friktionsjord. Friktionsjord är benägen att orsaka ras eller sättningar om marken är vattenmättad. När marken är mättad försämras friktionskraften och i sin tur hållfastheten (SGI, u.å.a).

2.5.2. Kohesionsjord

Kohesionsjord är jord som är utsatt för kohesionskrafter utöver friktionskrafterna. Kohesion kan beskrivas som ett bindningsmedel mellan jordpartiklarna och verkar på molekylnivå. Olika typer av ler- och siltjordar är inräknat i kohesionsjord samt jord som innehåller höga halter lera (SGI, u.å.a).

Ur ett byggnadstekniskt perspektiv är lera en svår jordart att bygga med då den är väldigt kompressibel och är känslig mot tunga laster som i sin tur leder till stora deformationer (NE, u.å.b). På grund av lerans låga vattengenomsläpplighet har vattnet svårt att genomtränga materialet vilket medför att det tar längre tid för vattnet att nå ett vattenmagasin eller ett jordlager som har en högre genomsläpplighet (Bovin m.fl., 2015)

Konstruktioner som byggs på lera utgör en stor risk för sättningar då jordarten anses vara känslig. Särskilt områden med mäktiga leralager som innehåller postglaciala leror och gytjeleror, exempelvis Göteborgsområdet (SGU, 2021)

Siltjordar är jordpartiklar som har en kornstorleken mellan 0.002 mm och 0.06 mm (SGI, u.å.b). Att bygga på siltjordar kan medföra stora konsekvenser. Siltjordens bärförmåga och stabilitet minskar avsevärt om det sker en vatteninfiltration. Om vattenutvinning däremot skulle vara låg så är skjuvhållfastheten och bärförmågan fortfarande hög (Larsson, 2008).

2.6. Geologi och hydrologi i Göteborg

Området som ska analyseras i denna studie är Göteborg och därför måste först de geologiska och hydrologiska förhållandena i området undersökas.

2.6.1. Jordartsgeologi

Analyserna baseras på Göteborgsområdet. Stora delar av Göteborg består av glacial lera där den är täckt med ett lager av postglacial lera. De mäktigaste lerlagren kan hittas i Göta älvdalen och sträcker sig djup i dalgångarna, upp till 50-100 meter. Leran i Göteborgsområdet är mestadels normalkonsoliderad vilket innebär att den utsätts för sin högsta last. Men det kan även förekomma svagt överkonsoliderad lera vid kustslätten. Om den glaciala leran skulle utsättas för last, från byggnader eller liknande, skulle det leda till sättningar (Bergström m.fl., 2022).

Morän förekommer även i området, däremot i mindre mängd jämfört med leran. Därför är det sällan stora moränbildningar och skikt stöts på i Göteborg. Trots detta är inte hela Göteborg moränfattigt. Göteborgsmoränen, den vanligaste och mest dominerande i området, är ett undantag och sträcker sig från Hisingen till norr om Orust. Jorddjupet för Göteborgsmoränen kan variera mellan 18 meter och 42 meter (Bergström m.fl., 2022).

2.6.2. Hydraulisk konduktivitet

Markens vattengenomsläpplighet, även kallad hydraulisk konduktivitet eller permeabilitet, påverkas av jordarten och marktypen. Den hydrauliska konduktiviteten kan variera i marken. En jord med hög genomsläpplighet kommer leda vatten fortare genom marken vilket i sin tur gör att slutsättningen nås på en kortare tid (Bovin m.fl., 2015). Den hydrauliska konduktiviteten hos ett material har en stor påverkan på grundvattensänkningarna och sättningarna (Larsson, 2008).

Figur 2 visar den hydrauliska konduktiviteten för olika jordarter. Permeabiliteten för morän varierar beroende på jordartens sammansättning (Larsson, 2008).

Jordart	Permeabilitet m/s	Tätvärde
Moräner (månggraderad jord)		
Grusig morän	$10^{-5} - 10^{-7}$	5 - 7
Sandig morän	$10^{-6} - 10^{-8}$	6 - 8
Siltig morän	$10^{-7} - 10^{-9}$	7 - 9
Lerig morän	$10^{-8} - 10^{-10}$	8 - 10
Moränlera	$10^{-9} - 10^{-11}$	9 - 11
Sediment (ensgraderad jord)		
Fingrus	$10^{-1} - 10^{-3}$	1 - 3
Grovsand	$10^{-2} - 10^{-4}$	2 - 4
Mellansand	$10^{-3} - 10^{-5}$	3 - 5
Finsand	$10^{-4} - 10^{-6}$	4 - 6
Grovsilt	$10^{-5} - 10^{-7}$	5 - 7
Mellansilt-finsilt	$10^{-7} - 10^{-9}$	7 - 9
Lera	$< 10^{-9}$	> 9

Figur 2 Värden på hydraulisk konduktivitet (permeabilitet) för olika jordarter (Larsson, 2008)

2.6.3. Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodul är ett mått på jordens elastiska egenskaper och påverkar sättningarna (Jönsson, 2009). För att ta fram ett jordlagers deformationsegenskaper används olika sonderingsmetoder. Men vid saknad av undersökningsresultat finns karakteristiska värden för elasticitetsmodul, se figur 3 nedan.

Parameter	Lagring	Jordart					
		Silt	Sand	Grus	Sandmorän	Grusmorän	Sprängsten
ϕ_k	Löst lagrad	26°	28°	30°	35°	38°	40°
	Fast lagrad	33°	35°	37°	42°	45°	45°
E_k (MPa)	Löst lagrad	2	5	10	10	10	
	Fast lagrad	10	20	40	20	20	50

Figur 3 Karakteristiska värden för inre friktionsvinkel och elasticitetsmodul för olika jordarter [Olsson & Holm, 1993]

2.6.4. Grundvattennivå

Grundvattennivån varierar i hela Göteborg. Ett flertal mätningar har gjorts i området som visar att vattennivån varierar mellan 0.5 och 3 meter under markyta (SGU, u.å.b). Se bilaga 9.2 för grundvattennivåer i Göteborg.

2.6.5. Brunnar

Den vanligaste typen av brunnar i Sverige är bergborrade brunnar och storleken kan variera mellan 115 mm och 165 mm i diameter (SGU, 2023b). Det är brunnar som har borrats genom jordlagren ner till berggrunden för att kunna nå ett vattenmagasin. Dessa används mestadels för att hushålla bostäder med vatten. I Göteborg används en pumphastighet på någonstans mellan 100 - 1000 l/h för de flesta brunnar enligt SGU:s kartvisare.

3. Metod

I detta kapitel beskrivs en steg för steg metod hur grundvattensänkningar och sättningar orsakade av vattenpumpning kan simuleras i programmet GeoStudio.

3.1. GeoStudio

GeoStudio är ett datorprogram för geoteknisk analys där släntstabilitet, grundvattenflöde och deformationer hos en modell kan analyseras. GeoStudio innehåller flera olika produkter som möjliggör flera olika analyser för en och samma modell. Resultatet från en analys går sedan att använda som utgångspunkt för en annan. En kombinerad analys med SEEP/W och SIGMA/W gör det möjligt att analysera grundvattensänkningar i en sluten akvifer orsakad av pumpning ur en brunn och efterföljande sättningar.

3.1.1. SEEP/W

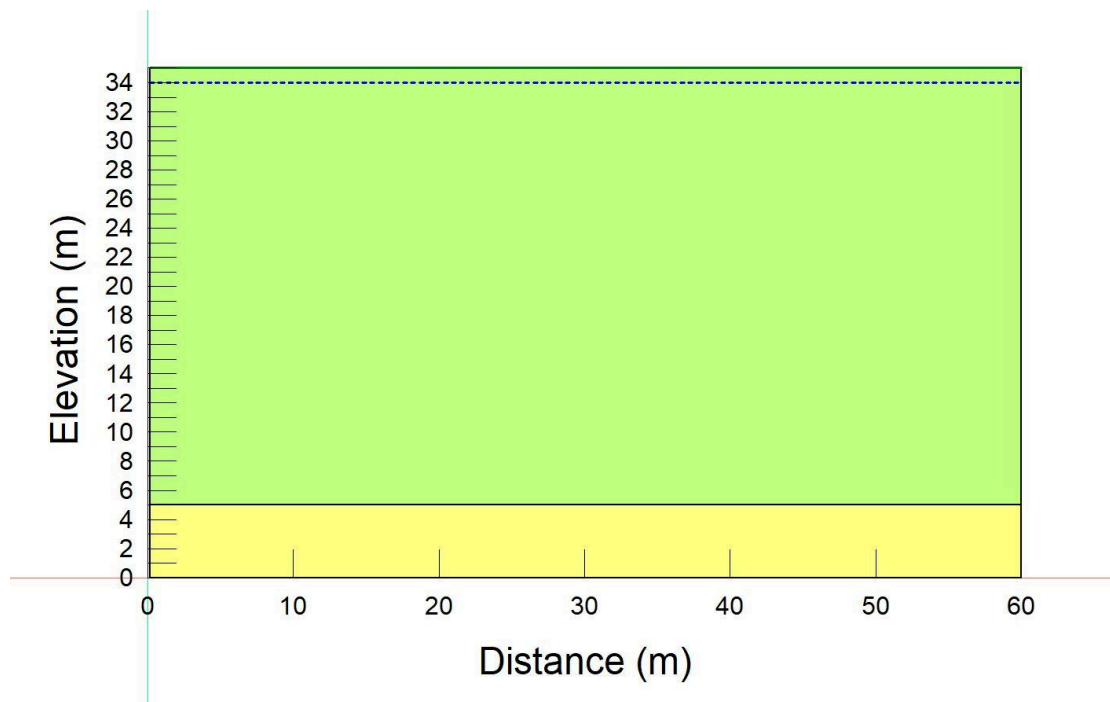
SEEP/W är ett program i GeoStudio som används för att analysera grundvattenflöde i genomsläppliga material som jordarter. Programmet kan användas för analys och design av geotekniska, civila, hydrogeologiska och gruvtekniska ingenjörprojekt.

3.1.2. SIGMA/W

SIGMA/W är ett annat program i GeoStudio där spännings- och deformationeranalyser kan utföras i jordstrukturer.

3.2. GeoStudio modell

Modellen som har analyserats är en sluten akvifer bestående av sand som har en tjocklek på 5 meter. Ovanliggande lager består av ett 30 meter tjockt lerlager. Jordlagerföljden är uppskattad med underlag från ett borrhål i Göteborg, se bilaga 9.1. Grundvattennivån är placerad en meter under marknivån. Se figur 4 för modellen i GeoStudio.

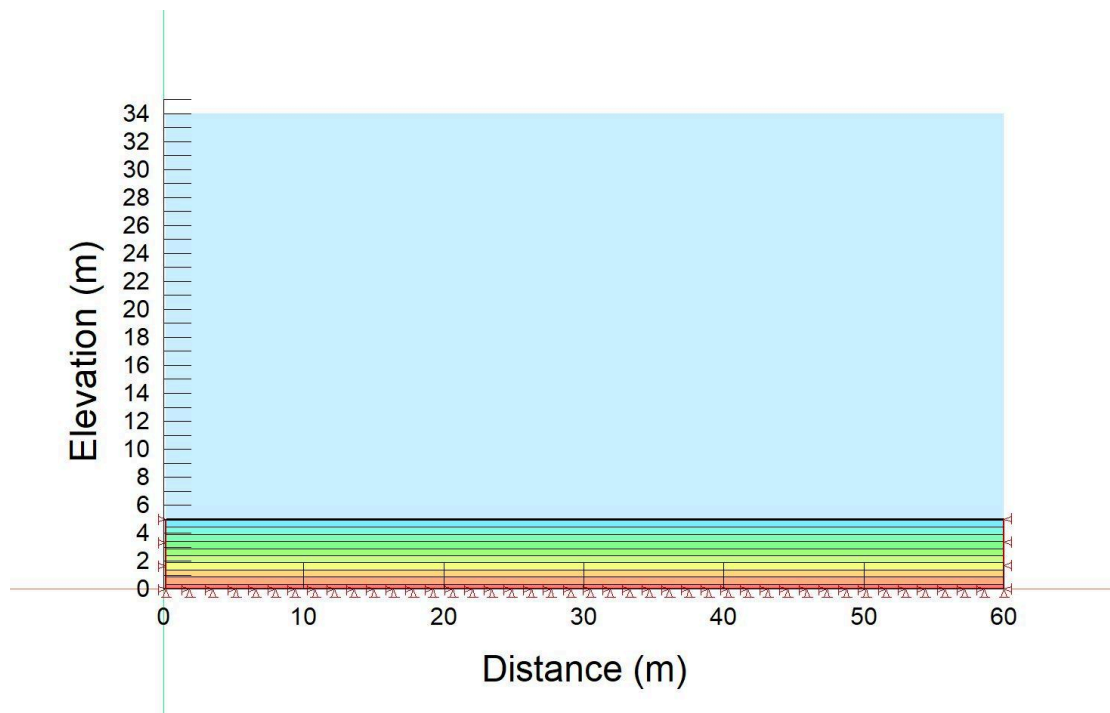


Figur 4 Modell i Geostudio med ett sandlager (gul) och ett lerlager (grön)

3.3. In-situ analys

Först gjordes en in-situ analys i SIGMA/W för att beskriva de initiala förhållandena i modellen. Genom att göra en in-situ analys i SIGMA/W med 2D axisymmetrisk geometri kunde grundvattenytans nivå och därmed porvattentrycket samt spänningarna i akviferen till en början erhållas. Grundvattennivån placerades en meter under markytan, alltså på nivån +34 meter. Akviferen antogs bestå av ett fem meter tjockt sandlager som antogs ha tunghet 20 kN/m^3 , en effektiv elasticitetsmodul på 5000 kPa och Poissons tal sattes till 0.334. Poissons tal beskriver hur jorden reagerar på tryckkrafter som leder till deformation.

Gränsvillkor för att ingen förflyttning eller rotation skulle kunna ske i x-led placerades på höger och vänster sida om modellen. Ett gränsvillkor för att ingen förflyttning eller rotation skulle kunna ske i varken x- eller y-led placerades i botten av modellen. Se figur 5 för modellen i SIGMA/W.

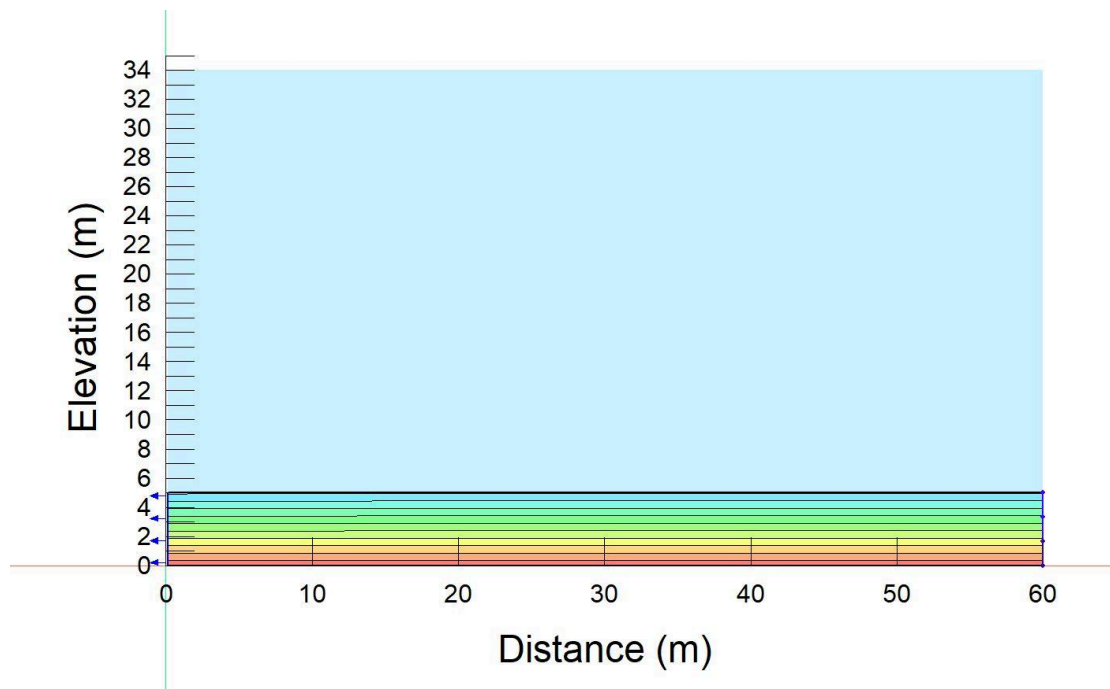


Figur 5 Modell för in-situ analys i SIGMA/W

3.4. Analys av grundvattenflöde

In-situ-analysen importerades sedan till SEEP/W för att analysera hur porvattentrycket ändras när vatten pumpas ur akviferen via en brunn. Eftersom akviferen antas vara sluten modelleras endast akviferen i den här analysen. I SEEP/W gjordes en transient flödesanalys för att få fram grundvattensänkningen efter olika tidpunkter. Akviferen bestod som tidigare nämnt av ett fem meter tjockt sandlager som kommer att vara fullt mättad under hela analysen. Den hydraulisk konduktivitet sattes till 0.002 m/s , porositet till 0.4 och kompressibilitet till 0.001 kPa^{-1} .

Längst till vänster i modellen har en brunn placerats som har en radie på 0.15 meter. Längs linjen som representerar brunnen adderades ett *Water Flux* gränsvillkor som ska simulera pumphastigheten. Pumphastigheten sattes till 0.025 m/s ($450\,000 \text{ l/h}$). Ett minus placerades framför hastigheten för att simulera att vattnet skulle lämna marken. Ett Total Water Head gränsvillkor på 34 m placerades längst till höger i modellen för att säkerställa att akviferen använder den initiala grundvattennivån under hela analysen. Se figur 6 för modellen i SEEP/W.

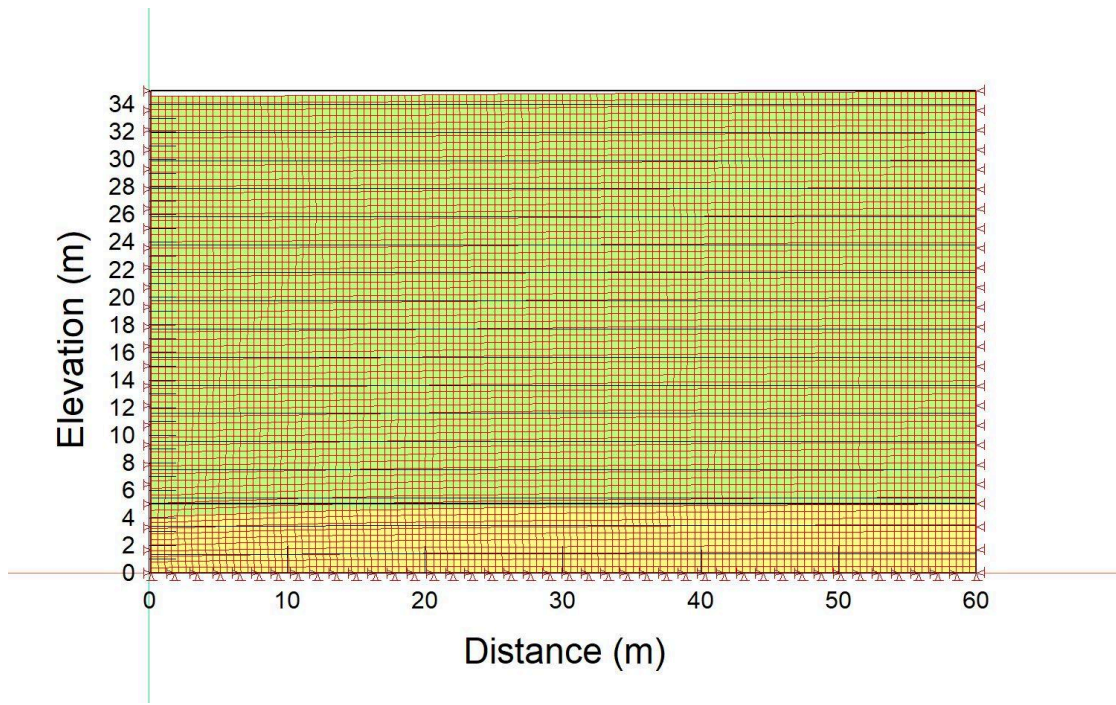


Figur 6 Modell för analys av grundvattenflödet i SEEP/W

3.5. Sättningsanalys

För att analysera sättningarna som uppkommer när porvattentrycket minskar gjordes en Volume Change analys i SIGMA/W med de två tidigare analyserna, in-situ och grundvattenflöde, som grund. I den här analysen applicerades ett 30 meter tjockt lerlager ovanpå akviferen för att kunna uppskatta hur stora sättningar som uppkommer vid markytan. Lerans tunghet ansattes till 17 kN/m^3 , den effektiva elasticitetsmodulen till 3000 kPa och Poissons tal antogs vara 0.45.

Gränsvillkor för att ingen förflyttning eller rotation skulle kunna ske i x-led placerades på höger och vänster sida om modellen. Ett gränsvillkor för att ingen förflyttning eller rotation skulle kunna ske i varken x- eller y-led placerades i botten av modellen. Se figur 7 för modellen i SIGMA/W.



Figur 7 Modell för sättningsanalys i SIGMA/W

4. Resultat

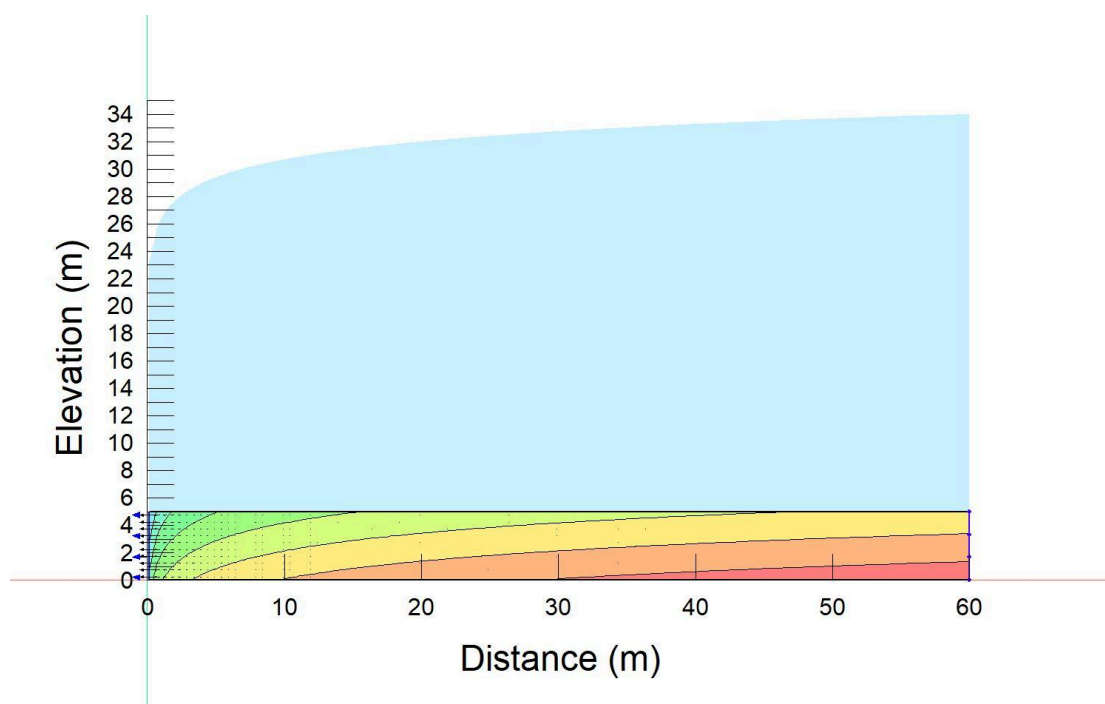
Resultat för grundvattensänkning och sättningar orsakade av pumpning för modellen som beskrivits i kapitel 3 finns presenterade i detta kapitel. Syftet med den här studien var även att analysera hur olika förhållanden och parametrar kan påverka resultatet. Detta kapitel innehåller därför också resultat från några ytterligare analyser där parametrarna varierar.

4.1. Analys 1

I detta avsnitt redovisas resultaten från modellen som beskrivits i metoden ovan. Se bilaga 9.3 för sammanställning av samtliga parametrar för analys 1.

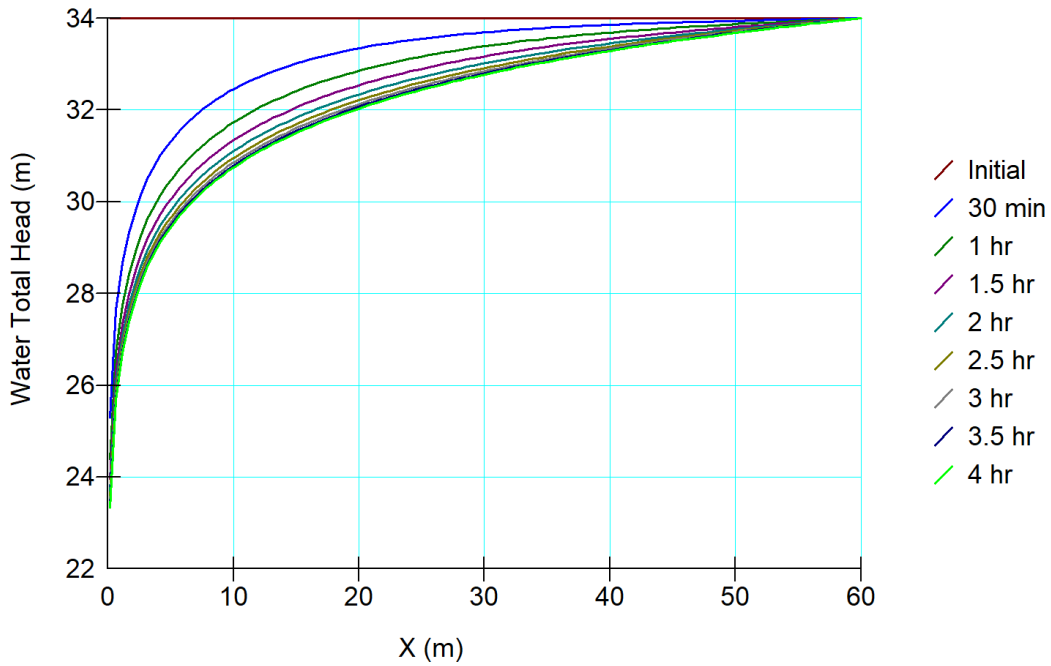
4.1.1. Resultat av grundvattensänkning

Hur grundvattensänkningen och porvattentrycket i akviferen kommer se ut efter 4 timmar pumpning visas i figur 8. Anledningen till att pumptiden inte uppgår till mer än fyra timmar i analyserna är på grund av att det visade sig att grundvattennivån inte sjönk något mer efter det och att slutsättningen redan uppstått.



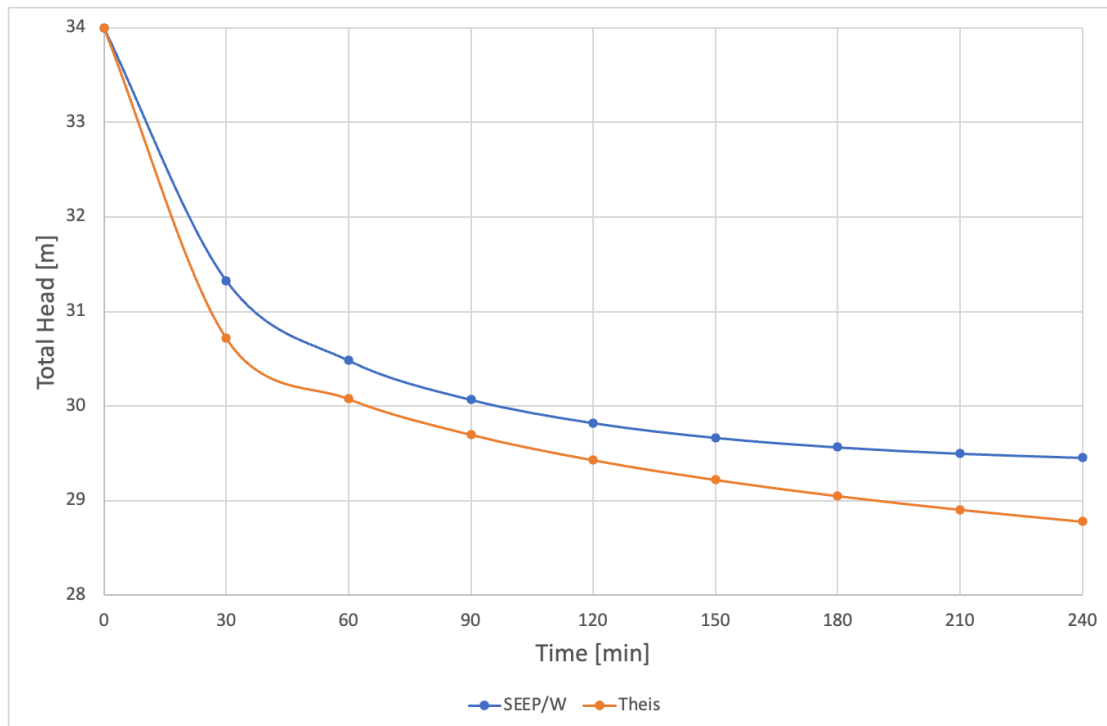
Figur 8 Grundvattensänkning efter 4 timmar pumpning

Figur 9 visar en graf över grundvattensänkningar mot avstånd från brunnen vid olika tidpunkter.



Figur 9 Grundvattensänknings mot avstånd från brunnen vid olika tidpunkter

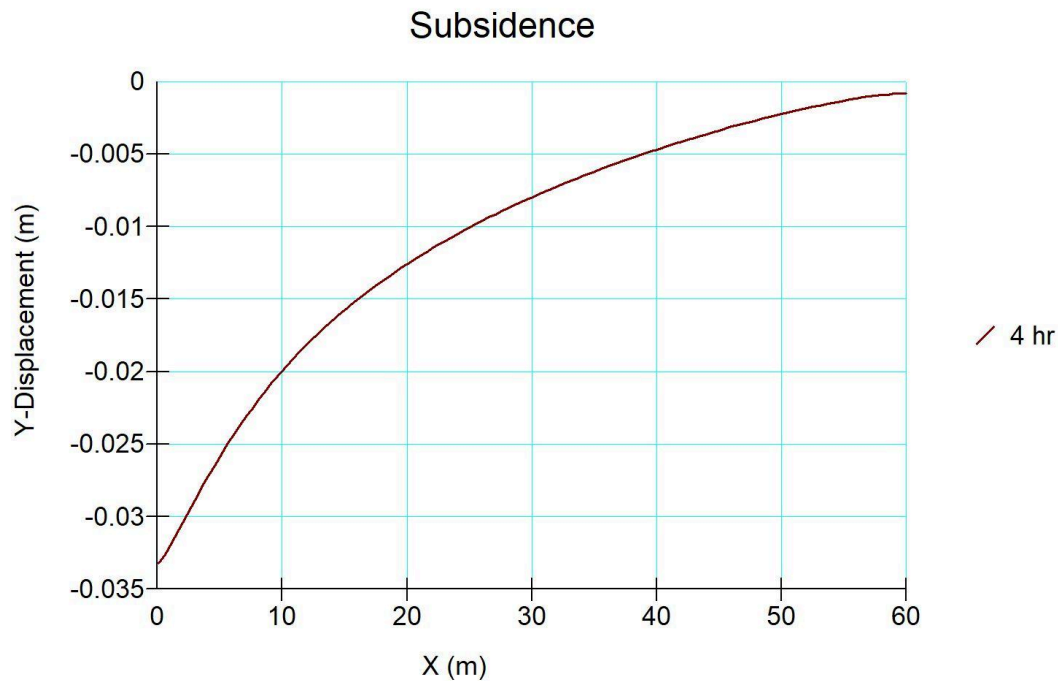
Figur 10 jämför lösningen i SEEP/W med Theis ekvation för grundvattensänknings på ett avstånd på 5 meter från brunnen. Resultatet visar en viss skillnad på grundvattenytan (*total head*) mellan SEEP/W och Theis. Till en början är lösningarna nästintill likvärdiga för att sedan avvika mer och mer från varandra.



Figur 10 Jämförelse av SEEP/W och Theis på ett avstånd 5 meter från brunnen

4.1.2. Resultat av sättningar

Grafen i figur 11 visar sättningarna storlek från ett visst avstånd från brunnen efter 4 timmars pumpning.



Figur 11 Sättningar orsakade av pumpning

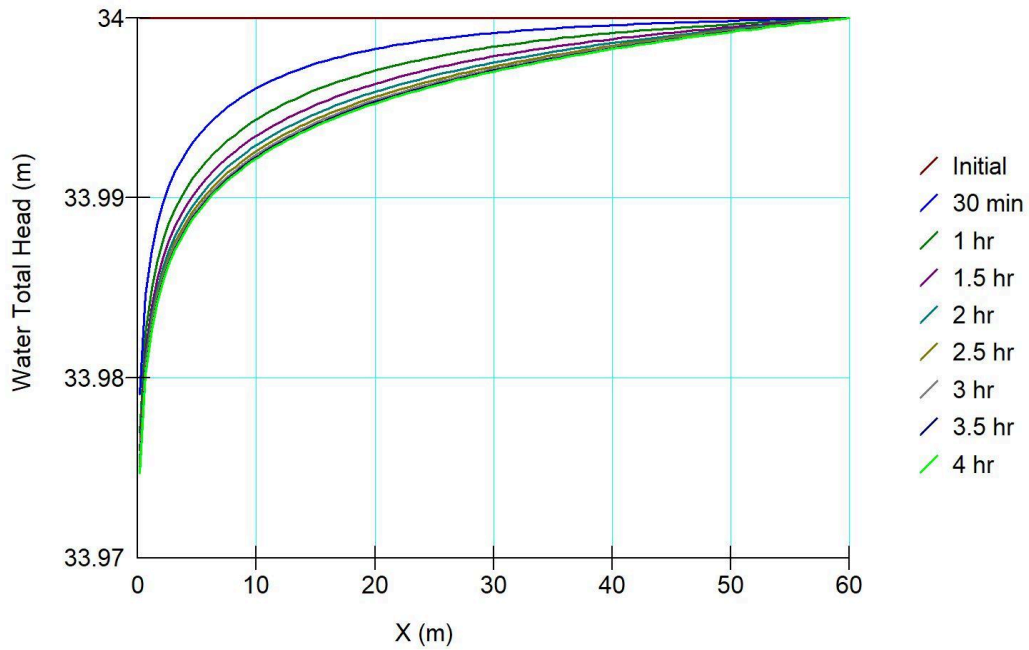
4.2. Indatans påverkan på resultatet

Som tidigare nämnts så kommer markens förhållanden och parametrar att påverka grundvattensänkningarna och sättningar. För att analysera hur olika indatan kan påverka resultatet gjordes ytterligare analyser av modellen där parametrarna ändras. Parametrar som ändrades var pumphastigheten, den hydrauliska konduktiviteten, elasticitetsmodulen.

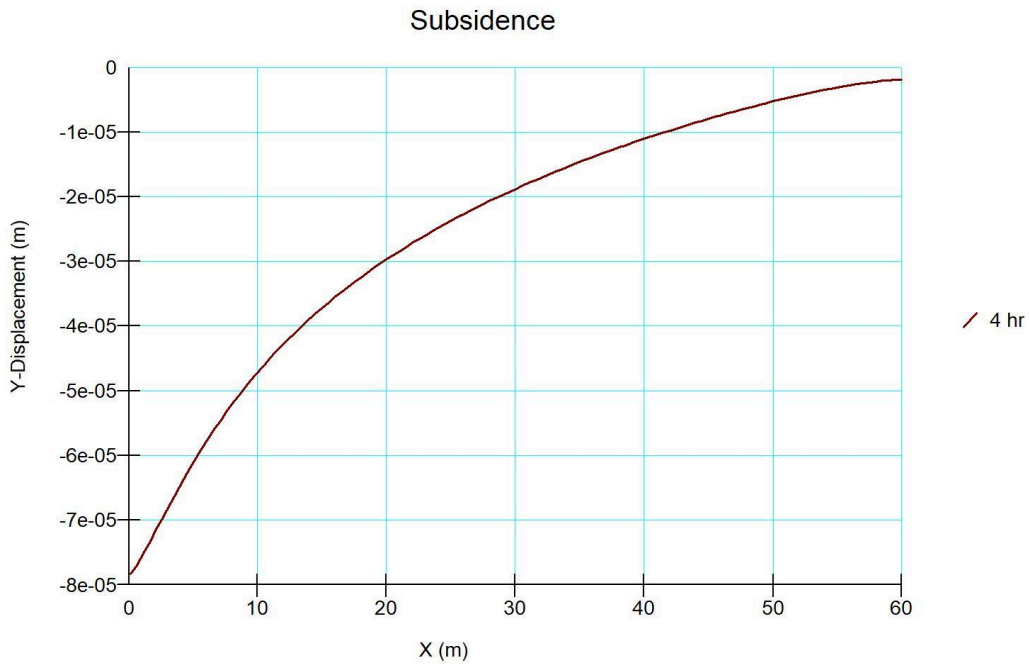
4.2.1. Analys 2 - Standardpumphastighet i Göteborg

Mängden vatten som vanligt utvinns ur brunnar i Göteborg idag är som tidigare nämnt mellan 100 - 1000 l/h.

Figur 12 visar en graf över grundvattensänkningar vid olika tidpunkter med en pumphastighet på 1000 l/h. Figur 13 visar efterföljande sättningar. Se bilaga 9.3 för sammanställning av samtliga parametrar för analys 2.



Figur 12 Grundvattensänkringar mot avstånd från brunnen vid olika tidpunkter med pumphastighet 1000 l/h



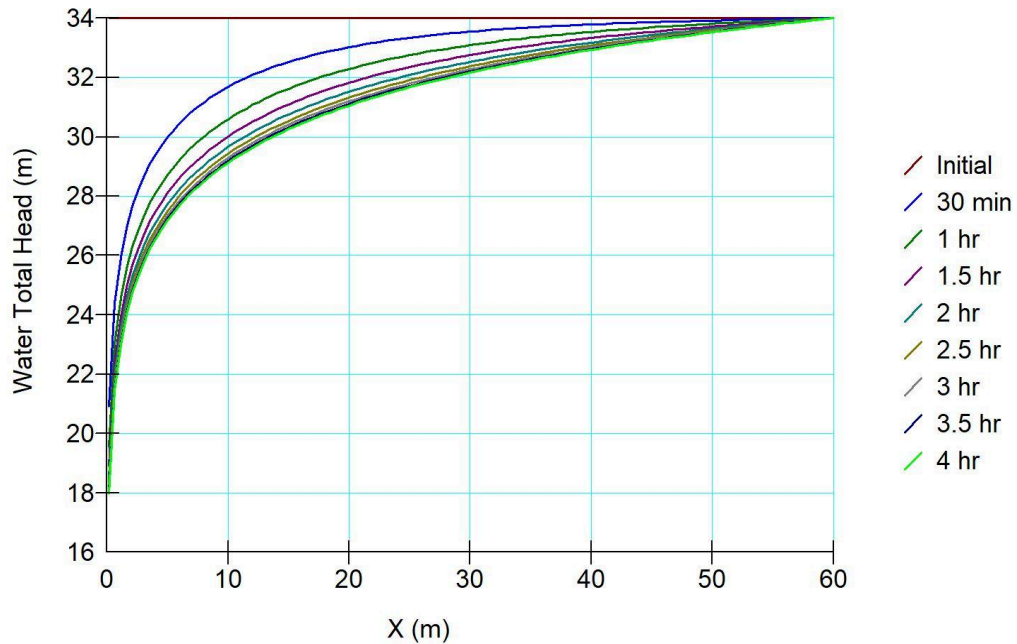
Figur 13 Sättningar mot avstånd från brunnen efter 4 timmar med pumphastighet 1000 l/h

4.2.2. Analys 3 - Sättningskrav

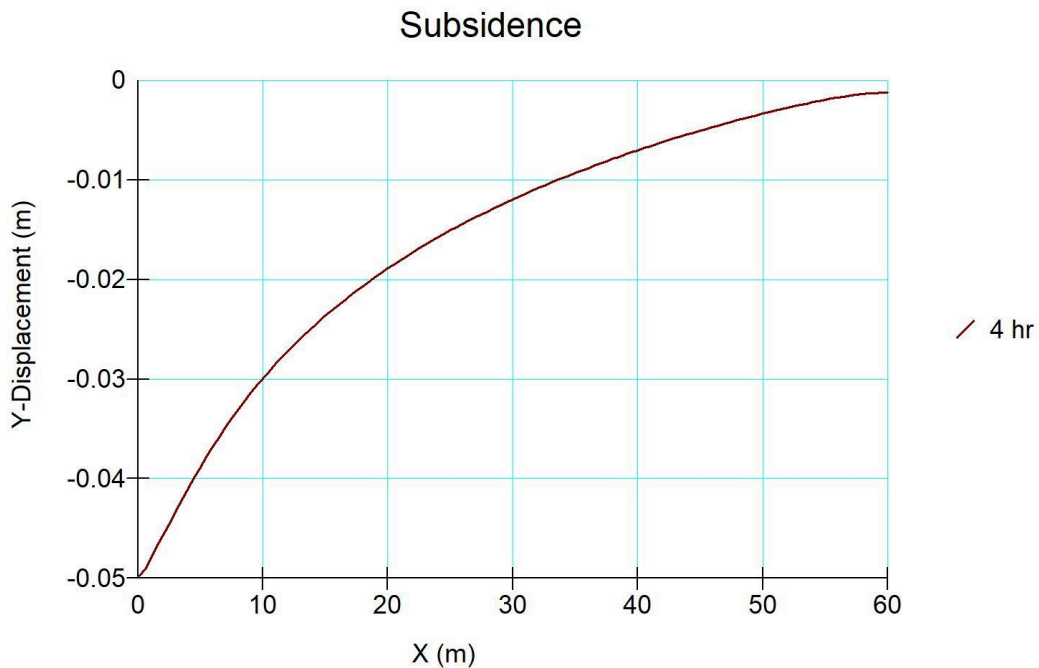
Om Eurokodes tidigare nämnda sättningskrav på 50 mm ska följas är det möjligt att använda en pumphastighet på 635 850 l/h innan kravet överskrids. För att komma

fram till resultatet testades olika pumphastigheter tills en sättning på 50 mm uppnåts. Se bilaga 9.3 för sammanställning av samtliga parametrar för analys 3.

Se figur 14 för att se grundvattensänkningar vid olika tidpunkter och figur 15 för sättningarna som uppstår med pumphastighet 635 850 l/h.



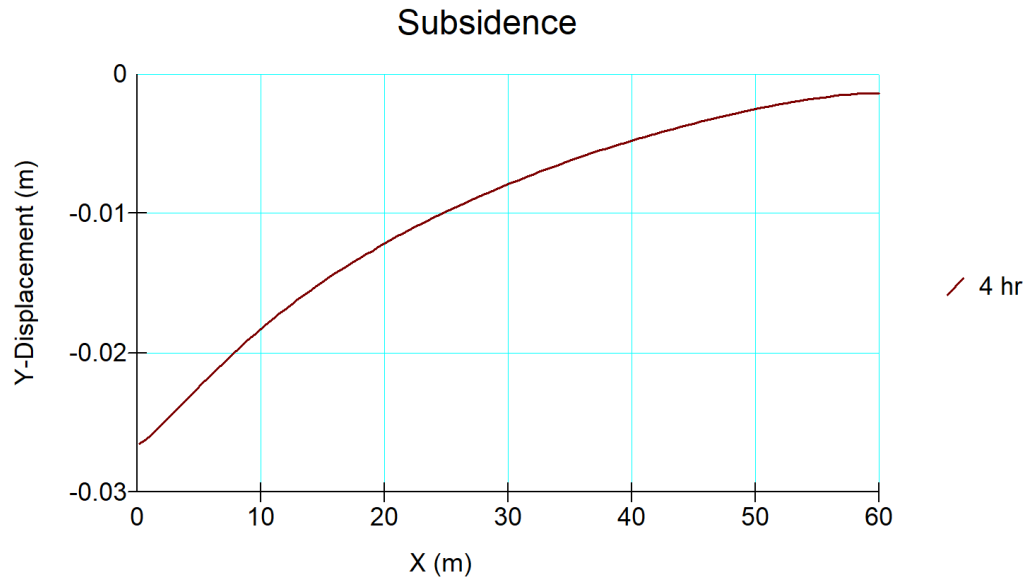
Figur 14 Grundvattensänkningar mot avstånd från brunnen vid olika tidpunkter med pumphastighet 635 850 l/h



Figur 15 Sättningar mot avstånd från brunnen efter 4 timmar med pumphastighet 635 850 l/h

4.2.3. Analys 4 - Elasticitetsmodul

I analys 4 ökades värdet på elasticitetsmodulen för det 30 meter tjocka lerlagret som är placerat ovanpå akviferen till 10 000 kPa. Se bilaga 9.3 för sammanställning av samtliga parametrar för analys 4. Figur 16 visar sättningarna som uppstår med en elasticitetsmodul på 10 000 kPa.



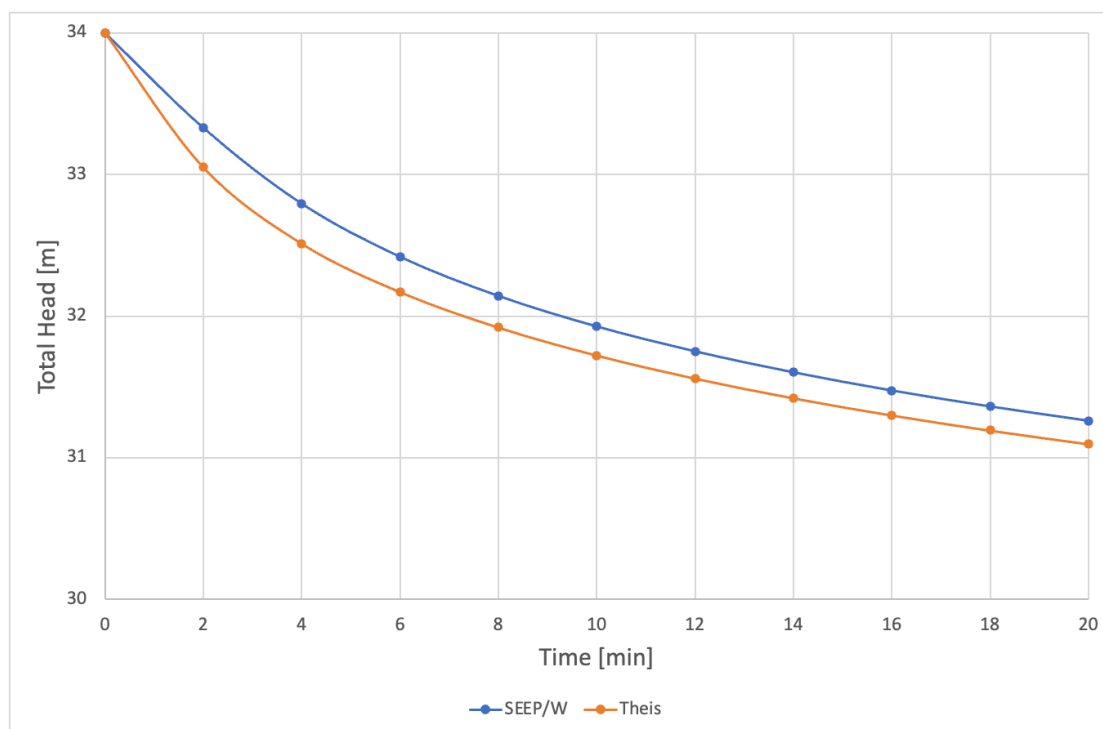
Figur 16 Sättningar mot avstånd från brunnen efter 4 timmar med elasticitetsmodulen 10 000 kPa

5. Diskussion

Analyserna som gjorts i GeoStudio visar att vattenpumpning ur en brunn från en sluten akvifer kommer att leda till grundvattensänkningar och sättningar. Men pumphastigheten och markens förhållande är direkt avgörande för hur stora grundvattensänkningar och sättningar som uppstår.

Modellen som använts i GeoStudio för den här studien är grovt förenklad där endast två jordlager har applicerats på modellen. I verkligheten är jordlagerföljden mer komplex än så där markegenskaperna hela tiden varierar med djupet. En modell med fler lager hade gett ett mer tillförlitligt resultat.

Analys 1 kan ses som grundanalysen som används för att kunna jämföra hur olika parametrar kan påverka resultatet. I analys 1 valdes en relativt hög pumphastighet för att få tydliga resultat på att grundvattennivån sjönk och att sättningar uppstår. Efter fyra timmar hade grundvattennivån sjunkit omkring tio meter och sättningarna uppgick till 3.3 cm närmast brunnen. Analys 1 jämfördes sedan med Theis lösning för en grundvattensänkning i en sluten akvifer. En jämförelse som gjordes för att se så att resultaten i GeoStudio är nära verkligheten och en tillförlitlig metod att använda. Figur 10 visar en viss skillnad mellan SEEP/W och Theis. Det kan förklaras med att pumptiden är relativt lång och som går att utläsa av figur 10 så blir differensen mellan SEEP/W och Theis större med tiden. Figur 17 nedan visar en jämförelse mellan SEEP/W och Theis under en kortare tid, där skillnaden är betydligt mindre.



Figur 17 Jämförelse av SEEP/W och Theis under 20 minuter

Vid analys 2 användes en betydligt lägre pumphastighet på 1000 l/h. En hastighet som normalt brukar användas i Göteborg för brunnar som hushåller bostäder med vatten. Resultatet visade att grundvattennivån knappt sjönk någonting och sättningarna blev minimala. Detta innebär att risken för allvarliga sättningar från

vattenutvinning i Göteborg är liten. Men detta gäller alltså bara områden där den här låga pumphastigheten används.

Något tydligt krav kring sättningar i marken finns inte i Sverige. Men om Eurokods sättningsrekommendationer ska följas så får totalsättningen för en normal konstruktion inte överskrida 50 mm. Resultatet av analys 3 visar att 653 850 l/h kan utvinnas ur brunnen utan att rekommendationen på 50 mm överskrids. Någon last har däremot inte applicerats på modellen vilket gör att den analysen inte blir helt tillförlitlig. Laster såsom byggnader ger tillskottsspänningar som kommer påverka sättningen i marken.

I analys 4 ökades elasticitetsmodulen på lerlagret till 10 000 kPa för att se hur den påverkar sättningarna. Sättningarna uppgår då till 2.7 cm, alltså en minskning jämfört med analys 1. En högre elasticitetsmodul innebär att en större kraft krävs för att marken ska deformeras. Resultatet av analys 4 visar att sättningarna blir mindre jämfört med analys 1 vilket stämmer bra överens med teorin.

Den hydrauliska konduktiviteten för akviferen, som i detta fall innebär den hydrauliska konduktiviteten för sandlagret, kommer även att påverka grundvattensänkningen. Men i detta arbete har det valts att inte göra någon vidare analys över hur det kan påverka. Det är alltså någonting som kan vara intressant att analysera i ett vidare arbete.

Utöver de geologiska omständigheterna så kommer även en konstruktions storlek avgöra om sättningarna leder till några allvarligare skador. Resultaten ovan visar att en längre konstruktion kommer få en större differentialsättning jämfört med en kortare byggnad. Konstruktionen kommer då få en kraftig lutning som kan få allvarliga konsekvenser.

I modellen har avståndet från brunnen begränsats till 60 meter. Även om sättningarna där är små så visar resultatet att vattenutvinning ur en akvifer även kan påverka marken mer än 60 meter bort från brunnen. Detta innebär att det är viktigt att undersöka ett stort område kring en plats där det planeras att utvinna grundvatten så att inte sättningarna orsakar skador på någonting.

6. Effekter och åtgärder

Skador som orsakas av sättningarna kan variera beroende på de geologiska omständigheterna och materialet på byggnaden. Konstruktioner som består av tegel är känsligare mot sättningar jämfört med betongbyggnader och risken för skador är större för större byggnader jämfört med mindre (Sundell, 2018). Geologiska faktorer spelar även en stor roll. Beroende på markens komposition, om marken består mestadels av kohesionsjord eller friktionsjord, kommer även det att påverka storleken på sättningarna samt tiden för att nå slutsättningen.

De vanligaste skadorna som uppstår på byggnader är olika typer av sprickor. Det kan vara smala och försumbara sprickor som endast påverkar utseendet på byggnaden och som är relativt lätt att åtgärda. Sedan finns det allvarligare sprickor som kan påverka byggnadens funktion och stabilitet (Sundell, 2018). Utöver skador på konstruktioner, finns även risken för förstörelse av avloppssystem och liknande underjordiska system (Hasanuddin, m.fl., 2015).

Ett sätt att klassificera allvarligheten på skadorna är genom Burlands skala. Där är en skala betygsatt från noll till fem och tar hänsyn till utseendet, funktionalitet och stabilitet. Betyget noll till två innebär lindriga skador som lätt kan repareras där sprickorna är mellan 0.1 och 5 mm breda. De ska dessutom inte ha någon påverkan på byggnadens utseende. Betyg tre och fyra innebär att sprickorna är mellan 5 och 25 mm samt att antalet sprickor är fler än tre till antalet. Funktionen på byggnaden har försämrats måttligt och kräver reparationer. Femman i skalan beskriver att byggnaden har ännu fler sprickor och dess storlek är större än 25 mm. Byggnadens stabilitet och funktion har försämrats avsevärt och kräver extensiva reparationer (Burghignoli, A., m.fl., 2013).

Skador på byggnader och dess funktion räknas som direkta konsekvenser. Men det finns även indirekta konsekvenser såsom ekonomiska kostnader, försämring på levnadsstandard och negativ påverkan på miljön (Hasanuddin, m.fl., 2015). Samtidigt är det viktigt att notera att dessa effekter inte är märkbara i Göteborg, då mängden vatten som får utvinnas regleras så att gränsen inte överskrids. I Jakarta, Indonesien, sker det ett omfattande grundvattenuttag utan någon hänsyn till mängden vatten som utvinns. I kombination med belastning från byggnader har detta lett till stora sättningar. Konsekvenserna har blivit att översvämningar har blivit allt vanligare i området och infrastrukturen har försämrats avsevärt (Hasanuddin, m.fl., 2015).

På platser där marken är känslig för sättningar kan det behövas markförstärkning. Det finns lite olika metoder att använda för att förstärka markens egenskaper. Några är packning, dränering och stabilisering (SGI, 2024). Vid packning används ofta vältrar för att packa ihop och på så sätt förstärka jorden. Vid dränering pressas vatten ur marken för att göra jorden fastare. Det är därför en effektiv metod där det finns mycket lera. Stabilisering är en metod där ett bindemedel blandas in i jorden. Det kan till exempel vara kalk och cement som bildar ett betongliknande material när det reagerar med jordpartiklarna och porvattnet i marken. För att minska risken för sättningar finns även några bra grundläggningsmetoder som bör användas. Platta på mark kan användas på mark med hög hållfasthet eller där det är korta avstånd ner till berg. Vid djupare jordlager används med fördel pålning (SGI, 2023b). En metod där pålar slås ner i marken för att föra ner krafterna till en mer bärkraftig jord eller berg.

För att förhindra framtida sättningar på grund av grundvattenutvinning bör kommunen sätta en gräns för hur mycket vatten som får pumpas ut. Enligt analys 2 finns det idag inga risker för sättningar vid normalbruk av vatten. Däremot kan det vara klokt att sätta en gräns eller rekommendation vid större utvinning av grundvatten för att minska risken för sättningar och skador.

7. Slutsats

I datorprogrammet GeoStudio har en metod tagits fram för att simulera en vattenutvinning ur en sluten akvifer. Resultatet av simuleringen visade att grundvattenytan sjunker och att den kommer att sjunka koncentriskt kring uttagspunkten. En sänkt grundvattennivå orsakar därefter att marken sjunker ihop och så kallade sättningar uppstår som kan få stora konsekvenser beroende på dess storlek.

Hastigheten som används vid vattenutvinningen spelar stor roll för hur stor grundvattensänkning som uppstår och sättningarnas storlek. En hög pumphastighet visade sig ge större sänkningar av grundvattennivån och därmed större sättningar. Pumphastigheten som används i de flesta brunnar i Göteborg idag är låg och riskerna för betydande sättningar är små. Att använda brunnarna i Göteborg på ett effektivare sätt hade alltså inte varit något problem.

Men även markens egenskaper och förhållanden påverkar resultatet. I det här arbetet analyserades elasticitetsmodulen påverkan. Det visade sig att en jord med hög elasticitetsmodul kommer kunna motstå sättningarna på ett bättre sätt.

Konsekvenser som kan uppstå av sättningar är att marken blir ojämn och byggnader som står placerade på marken börjar luta, får sprickor och kan i extrema fall förlora sin bärförmåga. För att undvika detta finns olika markförstärkning- och grundläggningsmetoder att ta till.

8. Referenser

- Adiyaman, I., & Budhu, M. (2012). *The Influence of Clay Zones on Land Subsidence from Groundwater Pumping*.
<https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.2012.00943.x#b18>
- Bergström, U., Pile, O., Curtis, P., Eliasson, T. (2022). *Göteborgsområdets berggrund, jordarter och geologiska utveckling*. [Göteborgsområdets berggrund, jordarter och geologiska utveckling \(sgu.se\)](https://www.sgu.se/utveckling/berggrund-jordarter-och-geologiska-utveckling)
- Bond, A, Schuppener, B, Scarpelli, G, Orr, T (u.å.) *Eurocode 7: Geotechnical Design 1 (ngm2016.com)*
- Bovin, K., Morén, I., Vikberg, E. (2015). *Tätande jordlager – en kunskapssammanställning*. [Tätande jordlager – en kunskapssammanställning \(sgu.se\)](https://www.sgu.se/utveckling/tatande-jordlager-en-kunskapssammanstallning)
- Burghignoli, A., Callisto, L., Rampello, S., Soccodato, F., Viggiani, G. (2013) *The crossing of the historical centre of Rome by the new underground Line C*
[The crossing of the historical centre of Rome by the new underground Line C \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/275111111)
- Faryabi, M. (2023). *A fuzzy logic approach for land subsidence susceptibility mapping: the use of hydrogeological data*.
https://www.researchgate.net/publication/370152169_A_fuzzy_logic_approach_for_land_subsidence_susceptibility_mapping_the_use_of_hydrogeological_data#pf5
- Hasanuddin Z. Abidin, H. Andreas, I. Gumilar, T.P. Sidiq, M. Gamal. (2015). *Environmental Impacts of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia*
https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts04i/TS04I_abidin_andreas_et_al_7568.pdf
- Jönsson, J. (2009). *Jämförelse mellan sättningsberäkningar med plaxis och mätningar in-situ* [Examensarbete, Luleå tekniska universitet]. [FULLTEXT01.pdf \(diva-portal.org\)](https://diva-portal.org/Fulltext/10165/1/FULLTEXT01.pdf)
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*.
<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>
- NE. (u.å.a.). *Akvifer*.
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/akvifer>
- NE. (u.å.b.). *Akvifug*.
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/akvifug>
- Olsson, C. & Holm, G. (1993). *Pålgrundläggning*.
<https://swedgeo.se/globalassets/publikationer/ovrigt/handbok-palgrundlaggning/forord-innehallsforteckning-beteckningar-begrepp.pdf>

Rovapalo, F. (2009). *MODERNA GRUNDER- KONCEPT GRUNDLÄGGNING FÖR FLERBOSTADSHUS*.

[Microsoft Word - Arbetet 1.6.doc \(lth.se\)](#)

SGI. (2023a). *Sättningar i småhus*.

<https://sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/sattningar-i-smahus/#:~:text=N%C3%A4r%20man%20bygger%20p%C3%A5%20lera,ihop%20ned%C3%A5t%20av%20husets%20tyngd>.

SGI. (2023b). *Grundläggningsmetoder*.

<https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/grundlaggningssmetoder/>

SGI. (2024). *Jordförstärkning*.

<https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/jordforstarkning/>

SGI. (u.å.a). *Jords hållfasthet*. [Jords hållfasthet - SGI \(swedgeo.se\)](#)

SGI. (u.å.b). *Jordarter*.

<https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/lera-och-kvicklara/>

SGU. (2023a). *Vattenförvaltning av grundvatten - ordlista*.

<https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/vattenforvaltning-av-grundvatten/om-vagledningen-vattenforvaltning-av-grundvatten/ordlista/>

SGU. (2023b). *Anläggning av brunn*. [Anläggning av brunn \(sgu.se\)](#)

SGU. (2021). *Isälvsediment, morän och berg*.

<https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/geologi-i-oversiktsplanering/byggande-och-infrastruktur/kostnader-och-resurseffektivitet-for-byggnation-pa-olika-markforhallanden/naturgrus-moran-och-berg/>

SGU. (1994). *Grundvattnet i Sverige*.

<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/ah/ah17beskrivning/ah17-beskrivning.pdf>

SGU. (u.å.a). *Risker*. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/>

SGU. (u.å.b). *Kartvisare och diagram för mätstationer*.

<https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/matstationer/>

SMHI. (2009). *Grundvatten*.

<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattnets-kretslopp/grundvatten-1.685>

Sundell, J. (2018). *Risk Assessment of Groundwater Drawdown in Subsidence Sensitive Areas*.

https://research.chalmers.se/publication/505182/file/505182_Fulltext.pdf

Sundström, M. (2019). *Kartläggning av riskområden för inducerad infiltration i grundvattentäcker*.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1331958/FULLTEXT01.pdf>

Svensson, J. (2012). *Hydraulisk konduktivitet i en morän*.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1028426/FULLTEXT02>

Sydvatten. (2023). *Vattnets kretslopp*.

<https://sydvatten.se/vattenfakta/vattnets-kretslopp/>

Sällfors, G. (2013). *Geoteknik, Jordmateriallära - Jordmekanik* (5. uppl.). Cremona Förlag vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg.

Theis, C.V. (1935). *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*.

<https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>

Tremblay, M. (1990). *Mätning av grundvattennivå och portryck*.

<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i11.pdf>

USGS. (2000). *Land Subsidence in the United States*.

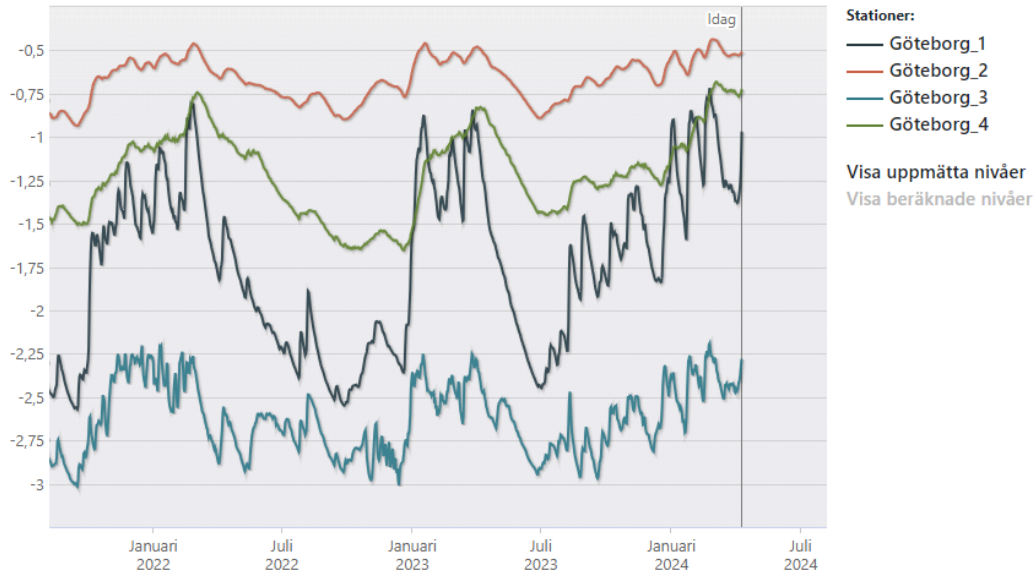
<https://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165/SubsidenceFS.v7.PDF>

9.2. Grundvattennivå i Göteborg

Graf över grundvattennivån i Göteborg mellan år 2022 och 2024 (SGU, u.å.b).

Nivå i meter under markyta för flera stationer

Diagrammet visar grundvattennivå i meter under markytan för uppmätta nivåer.



9.3. Sammanställning av parametrar för analys 1-4

Analys 1

Parameter	Sand	Lera	
Tunghet, γ [kN/m^3]	20	17	
Elasticitetsmodul, E [kPa]	5000	3000	
Poissons tal, ν [-]	0.334	0.45	
Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	0.002	10^{-7}	
Porositet, n [-]	0.4	0.6	
Kompressibilitet, κ [kPa^{-1}]	0.001	0.003	
Pumphastighet, Q [l/h]			450 000

Analys 2

Parameter	Sand	Lera	
Tunghet, γ [kN/m^3]	20	17	
Elasticitetsmodul, E [kPa]	5000	3000	
Poissons tal, ν [-]	0.334	0.45	
Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	0.002	10^{-7}	
Porositet, n [-]	0.4	0.6	
Kompressibilitet, κ [kPa^{-1}]	0.001	0.003	
Pumphastighet, Q [l/h]			1 000

Analys 3

Parameter	Sand	Lera	
Tunghet, γ [kN/m^3]	20	17	
Elasticitetsmodul, E [kPa]	5000	3000	
Poissons tal, ν [-]	0.334	0.45	
Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	0.002	10^{-7}	
Porositet, n [-]	0.4	0.6	
Kompressibilitet, κ [kPa^{-1}]	0.001	0.003	
Pumphastighet, Q [l/h]			635 850

Analys 4

Parameter	Sand	Lera	
Tunghet, γ [kN/m^3]	20	17	
Elasticitetsmodul, E [kPa]	5000	10 000	
Poissons tal, ν [-]	0.334	0.45	
Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	0.002	10^{-7}	
Porositet, n [-]	0.4	0.6	
Kompressibilitet, κ [kPa^{-1}]	0.001	0.003	
Pumphastighet, Q [l/h]			450 000



CHALMERS