

Grundvattenpåverkan kring schakter

- En jämförelse mellan olika
analytiska beräkningsmetoder

Axel Barkestedt

**Degree of Master of Science (120 credits)
with a major in Earth Sciences
45 hec**

**Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
2019 B1068**

Faculty of Science



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

Grundvattenpåverkan kring schakter

- En jämförelse mellan olika
analytiska beräkningsmetoder

Axel Barkestedt

ISSN 1400-3821

B1068
Master of Science (120 credits) thesis
Göteborg 2019

Mailing address
Geovetarcentrum
S 405 30 Göteborg

Address
Geovetarcentrum
Guldhedsgatan 5A

Telephone
031-786 19 56

Geovetarcentrum
Göteborg University
S-405 30 Göteborg
SWEDEN

Abstract

To be able to predict the effects on groundwater related to drawdown is of great importance to make sure that protected objects, such as drinking water wells and vulnerable ecosystems, are not affected. To predict the size of the area that will be affected by a drawdown, an analytical solution is often used to calculate the radius of influence. However, there are several different possible solutions and as of now there is no national Swedish standard on which solution is preferable. To deal with this issue, the Swedish geological survey (SGU) has created a guidance document (SGU, 2019a) in which some recommendations for choice of analytical solutions are included.

In this study, three different analytical solutions from SGU:s document have been put to practice at three sites with varying geological conditions. The three solutions were originally published by Krešić (1997), Marinelli and Niccoli (2000) and Todd and Mays (2005), respectively. All three are described as eligible to calculate the radius of influence related to drawdown in unconfined aquifers. The results from the calculations have been compared with actual measured groundwater levels as well as estimated areas of influence from previously published studies.

The results from this study shows that the solution from Todd and Mays repeatedly overestimates the area of influence. The solutions from Krešić and Marinelli and Niccoli, on the other hand, generates results with better consistency to recorded drawdown. Furthermore, the solutions from Krešić and Marinelli and Niccoli produce identical results when used on the three test sites. However, when put to test on fictive scenarios with very large well radii the results differ between the two methods. All three solutions are most sensitive to the hydrological conductivity parameter. Therefore, it is of great importance to determine this parameter with as high certainty as possible. The well radius is also essential to take into consideration as there are multiple ways of defining it. An analytical solution, together with a thorough hydrogeological investigation, can give a good estimate on the future extent of drawdown affected areas.

Sammanfattning

Att med trygghet kunna förutsäga grundvattenpåverkan från en avsänkning är av stor vikt för att kunna försäkra att skyddsvärda objekt, så som dricksvattenbrunnar eller känsliga ekosystem, inte påverkas. För att i förväg uppskatta området som kommer att påverkas av avsänkningen används ofta analytiska beräkningsmetoder för att beräkna influens- och påverkansområden. Flera olika beräkningsmetoder florerar dock och i Sverige finns för tillfället inga direktiv om vilken metod som är att föredra. För att bemöta detta har Sveriges geologiska undersökning tagit fram en handledning för bedömning av influensområde (SGU, 2019a) där rekommendationer på analytiska beräkningsmetoder ingår.

I den här studien har tre olika analytiska beräkningsmetoder som förekommer i SGU:s handledning tillämpats på tre studieområden med olika geologiska förutsättningar. De tre beräkningsmetoderna publicerades ursprungligen av Krešić (1997), Marinelli och Niccoli (2000) respektive Todd och Mays (2005). Alla tre beskrivs i SGU:s handledning som lämpliga till att beräkna influens- och påverkansområde för avsänkningar i öppna grundvattenmagasin. Beräkningsresultaten har jämförts med faktiska uppmätta grundvattennivåer samt uppskattade influens- och påverkansområden publicerade av tidigare studier.

Resultaten från studien visar på att Todd och Mays beräkningsmetod upprepar överskattar både influens- och påverkansområden. Krešićs samt Marinelli och Niccolis metoder generera däremot resultat med bättre överensstämmelse med uppmätta avsänkningar. Vidare har Krešićs samt Marinelli och Niccolis metoder genererat identiska resultat vid tillämpningen på de tre studieområdena. Resultaten från de båda metoderna skiljer sig dock från varandra vid fiktiva scenarier där anläggningsradien är betydligt större. Alla tre metoder uppvisar störst känslighet mot parametern hydraulisk konduktivitet, därför måste den bestämmas med så stor säkerhet som möjligt. Även anläggningsradien är viktig att ta hänsyn till då det finns olika sätt att definiera den på. En analytisk beräkningsmetod kan tillsammans med en hydrogeologisk utredning ge en god uppfattning om framtida influens- och påverkansområdets omfattning.

Innehållsförteckning

Abstract	I
Sammanfattning	II
Parameterbeteckningar.....	VI
Ordlista	VI
1 Introduktion.....	1
1.1 Inledning.....	1
1.2 Syfte och genomförande	1
2 Teoretisk bakgrund.....	3
2.1 Influensområde vs. Påverkansområde	3
2.2 Skyddsobjekt	3
2.3 Schakter	4
2.3.1 Vägportar.....	4
2.3.2 Skärningar.....	4
2.4 Hydrogeologiska begrepp.....	5
2.4.1 Vattenbalans.....	5
2.4.2 Grundvattenbildning	5
2.4.3 Grundvattnets strömning	5
2.5 Hydrogeologiska formler	6
2.5.1 Darcys lag.....	6
2.5.2 Hydrauliska flödesekvationen	6
2.5.3 Dupuits antagande	6
2.5.4 Brunns ekvationen.....	7
2.5.5 Empiriska och halvempiriska formler för influensradie	8
3 Områdesbeskrivning.....	9
3.1 Sörmotivet	9
3.2 Falkenberg	11
3.2.1 Stafsinge	11
3.2.2 Skrea norra	13
4 Metodbeskrivning	16
4.1 Analytiska metoder	16
4.2 Metod 1: Krešić	16
4.3 Metod 2: Marinelli och Niccoli	17
4.4 Metod 3: Todd och Mays.....	19

4.5	Sammanfattning analytiska modeller	20
4.6	Antaganden och osäkerheter	20
4.6.1	Antaganden och förenklingar	21
4.6.2	Osäkerheter	21
4.7	Använda data.....	22
4.7.1	Grundvattennivåer	22
4.7.2	Avsänkningar	22
4.7.3	Influens- och påverkansområden.....	24
4.8	Tillämpning av beräkningsmetoder.....	24
4.8.1	Sörmomotet	24
4.8.2	Stafsinge	24
4.8.3	Skrea norra	25
4.9	Metodjämförelse.....	25
5	Resultat.....	26
5.1	Beräkningsresultat och jämförelse med uppmätta grundvattennivåer.....	26
5.1.1	Sörmomotet	26
5.1.2	Stafsinge	27
5.1.3	Skrea norra	29
5.2	Metodjämförelse.....	30
5.2.1	Influensområde beroende av anläggningsradien.....	31
5.2.2	Anläggningsradiens effekt på Krešićs och Marinelli & Niccolis metoder	33
6	Diskussion.....	35
6.1	Jämförelse mellan beräkningsresultat och uppmätta grundvattennivåer.....	35
6.1.1	Sörmomotet	35
6.1.2	Stafsinge	35
6.1.3	Skrea norra	36
6.2	Metodjämförelse.....	36
6.3	Hantering av parametrar.....	38
6.3.1	Anläggningens radie	38
6.3.2	Hydraulisk konduktivitet	39
7	Slutsatser	41
8	Framtida studier	42
9	Tack.....	43
10	Referenser	44
11	Appendix.....	46
11.1	Sörmomotet	46

11.2	Stafsinge	46
11.3	Skrea norra	47

Parameterbeteckningar

För denna studie valda parameterbeteckningar, dess enheter och alternativa beteckningar förekommande i annan litteratur. L (längd) och T (tid) beskriver parametrarnas dimensioner.

Vald beteckning	Förklaring	Enhet	Alternativ beteckning
K	Hydraulisk konduktivitet	[L/T; m/s]	–
Q	Flöde	[L ³ /T; m ³ /s]	–
R	Influensradie	[L; m]	R ₀ , R ₁
r_a	Anläggningens radie	[L; m]	r _w , r ₀ , r, r _p
W	Grundvattenbildning	[L/T; mm/dag eller m/s]	G, R, N
H	Ursprunglig grundvattennivå	[L; m]	h ₀ , h ₁
h_a	Vattennivå i anläggningen	[L; m]	h _w , h, h ₂
s	Avsänkning	[L; m]	–

Ordlista

Anisotropi – En situation där en eller flera av ett grundvattenmagasins egenskaper varierar i olika riktningar. Motsatsen till isotropi.

Evaporation – Processen där vatten avdunstar från mark och vattenytor.

Evapotranspiration – Den sammanlagda summan av vatten som avdunstar genom evaporation och transpiration.

Heterogenitet – Att egenskaper hos ett geologiskt medium varierar inom mediet. Motsatsen till homogenitet.

Homogenitet – Att egenskaper hos ett geologiskt medium är de samma i hela mediet. Motsatsen till Heterogenitet.

Hydraulisk konduktivitet - Måttet på ett geologiskt materials förmåga att släppa igenom vatten. Uttrycks i meter per sekund (m/s).

Influensradie - Det avstånd inom vilket grundvattennivån sjunker till följd av ett grundvattenuttag eller en grundvattenbortledning.

Isotropi – En situation där ett grundvattenmagasins hydrauliska egenskaper är lika i alla riktningar. Motsatsen till anisotropi.

Konceptuell modell – Förenklad modell av ett verkligt system.

Slutet grundvattenmagasin – Ett grundvattenmagasin som överlagras av ett geologiskt lager med betydligt lägre hydraulisk konduktivitet än magasinets.

Transpiration – Processen där vatten avdunstar från växters blad.

Öppet grundvattenmagasin – Ett grundvattenmagasin där grundvattnet avgränsas uppåt av en fri grundvattenyta där det hydrostatiska trycket är lika med atmosfärstrycket.

1 Introduktion

1.1 Inledning

Schakter är idag ett vanligt förekommande inslag i det maskineri vi kallar samhällsbyggnad. De förekommer i alla möjliga typer av projekt, till exempel bostadsbyggnationer, infrastrukturprojekt, gruvbrytning och en mängd andra verksamheter där arbete utförs under markytan. I flera fall kräver projekteringen att permanenta schakter måste uppföras för att möjliggöra byggnationen. För att dessa inte ska svämmas över vid kraftig nederbörd måste de avvattas med hjälp av dräneringar, dränledningar och pumpstationer som tar hand om dagvatten.

När schakt dock hamnar på nivåer under grundvattenytan måste även grundvatten hanteras och ledas bort, vilket i sin tur kan resultera i en sänkning av omgivande grundvattennivåer. Denna sänkning uttrycker sig i form av en avsänkningstratt i den lokala grundvattennivån, oftast med schaktet som dess mittpunkt. Området som påverkas av denna avsänkningstratt kallas för *influensområde*.

Även projekteringen av mindre schakter, vilka är relativt småskaliga projekt jämfört med andra betydligt större infrastrukturprojekt, är inte helt problemfria. En sänkning av grundvattennivån kan på lokal nivå få oönskade effekter som till exempel: kapacitetsminskning hos brunnar för vattenförsörjning eller geoenergi; sättningsskador i mark och/eller byggnader i närheten av schaktet; negativ påverkan på grundvattenberoende ekosystem när vegetationens vattentillförsel minskas, för att nämna några. Dessa känsliga objekt, kallade *skyddsobjekt*, bör behandlas med extra aktsamhet under projekteringen.

I planeringsfasen av ett nytt schakt är det av stort intresse att veta hur influensområdets utsträckning kan komma att se ut, det för att kunna förutse om avsänkningen kan förväntas påverka intilliggande skyddsobjekt. Tidigt görs då en beräkning för att uppskatta en storlek. Hur detta influensområde beräknas beror på vilken metod man väljer att använda sig av och det finns ett urval av olika beräkningsmetoder och tillvägagångssätt att välja mellan. Metoderna grundar sig oftast i samma teorier men dess ekvationer skiljer sig tillräckligt mycket från varandra för att generera olika resultat. I dagsläget finns det i Sverige ingen nationell standard för vilken beräkningsmetod som är att föredra givet olika förutsättningar och metodval skiljer sig mellan personer och företag, något som kan leda till viss förvirring och i värsta fall missförstånd och misstag.

Att det fanns en efterfrågan av någon form av handledning i dessa hydrogeologiska problemställningar uppmärksammades av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och under 2017 anordnade de en workshop för intressenter inom branschen (SGU, 2019a). Diskussioner under denna workshop resulterade i beslutet att SGU ska ta fram ett dokument som ska fungera som en handledning i frågor gällande grundvattensänkningar och beräkningar av influensområden (SGU, 2019a). Det är med utgångspunkt i detta dokument, vilket i skrivande stund är nära publicering, som den här studien försöker att tillämpa de metoder som det där i redogörs för.

1.2 Syfte och genomförande

Utgångsläget för denna studie har varit att försöka simulera en situation tidigt i projekteringen av ett schakt, en situation då endast begränsad mängd data finns att tillgå. Då kan det vara relevant att använda en analytisk beräkningsmetod för att snabbt och till låga kostnader kunna skapa en grov översiktlig bild av hur schaktet kommer att påverka grundvattennivåerna i området. Tillvägagångssättet har varit att tillämpa tre olika metoder som föreslås i SGU:s handledning på tre olika avsänkingsförhållanden och analysera hur tillämpbara de är i de respektive olika förhållandena. Ändamålet med detta är att skapa ett bättre underlag för framtida hydrogeologiska undersökningar och underlätta i val av beräkningsmetod. De tre analytiska beräkningsmetoderna som har valts ut är

publicerade av Krešić (1997); Marinelli och Niccoli (2000); och Todd och Mays (2005) respektive. Det har undersökts hur beräkningsmetoderna reagerar på varierade storleksordningar på ingående parametrar och tester har utförts för att försöka bestämma metodernas känslighet för de använda parametrarna. Vidare, genom att testa dessa tre metoder för att beräkna influensområde på samma studieområden och sedan jämföra respektive metoders uträknade resultat med befintliga uppmätta grundvattennivåer, är det även möjligt att urskilja vilken beräkningsmetod som ger resultat med god överensstämmelse med det verkliga utfallet. Utöver de tre analytiska beräkningsmetoderna som valts ut redogörs även för några enklare metoder som bedömts som olämpliga för studien och därför inte testats. Anledningen till att de trots det omnämns är för att belysa deras svagheter då de används regelbundet inom branschen. Utgångspunkt för detta arbete är dock den handledning SGU tagit fram som stöd till grundvattenutredningar. Studiens syfte kan sammanfattas i följande frågeställningar:

- Hur tillämpbara är de olika analytiska beräkningsmetoderna? Hur skiljer sig arbetssätten åt? Är det fördelaktigt att använda en metod framför de andra i en särskild situation?
- Hur skiljer sig resultaten mellan de olika analytiska beräkningsmetoderna? Vilken av de utvalda beräkningsmetoderna är bäst lämpad för att beräkna grundvattenavsänkning runt de utvalda studieområdena? Vilken metod ger bäst passning mot uppmätta värden?
- Vilken/vilka parametrar är metoderna mest känsliga för? Vilken/vilka är viktigast att bestämma med störst säkerhet?

2 Teoretisk bakgrund

2.1 Influensområde vs. Påverkansområde

Influensområde och *påverkansområde* är i det här sammanhanget två väldigt centrala begrepp som förståeligt är lätta att förväxla. SGU (2019a) beskriver hur termerna uppfattas och används som synonymer bland många hydrogeologer och i en rapport av Werner, Onkenhout, och Löv (2012) beskrivs de två begreppen specifikt som synonymer. Det är något som SGU (2019a) inte instämmer med och enligt dem definieras begreppen som följande:

- **Influensområde:** "det område inom vilket man kan mäta att grundvattennivåerna sjunker till följd av grundvattenuttag eller grundvattenbortledning" (SGU, 2019a, s. 11). Det innebär att vid influensområdets yttersta gräns, alltså influensradien, är påverkan från vattenverksamheten obefintlig. Influensområde är enligt SGU ett hydrogeologiskt begrepp.
- **Påverkansområde:** "det största område inom vilket ändringen i grundvattennivå får vara större än medgiven ändring i grundvattennivå till följd av grundvattenuttag och/eller grundvattenbortledning" (SGU, 2019a, s. 10). Detta medför att utanför påverkansområdets gräns kan fortfarande en avsänkning ske som följd av vattenverksamheten men den får inte överstiga ett förbestämt värde. Den maximala avsänkningen vid påverkansområdets gräns får inte vara större än ett visst bestämt värde. Exempel på vanligt förekommande satta värden är 0,3 meter avsänkning i jord och 1 meter i berg, vilket motsvara de vanliga årstidsvariationerna hos grundvattnet. En avsänkning större än de naturliga variationerna kan innebära skada eller påverkan på omgivningarna, därav namnet *påverkansområde*. Avståndet till den förbestämda avsänkningen är då påverkansområdets radie. Påverkansområde är enligt SGU en juridisk term och används bland annat i tillståndsprövningar.

Ett påverkansområde är med andra ord alltid mindre eller lika stort som det bedömda influensområdet, men aldrig större. Då dessa områden kan skilja i storlek sinsemellan är det av stor vikt att inte bara tydligt redogöra vilket av dem man syftar på utan också ha det klart för sig att man använder rätt begrepp. Missförstånd kan annars lätt uppstå och få oönskade konsekvenser som följd. Som ett gemensamt begrepp för att inkludera både influensområde och påverkansområde har termen *avsänkingsområde* använts som ett paraplybegrepp i denna studie.

Att det kan vara svårt att påvisa att en avsänkning beror på vattenverksamhet är ofta anledningen till att begreppet påverkansområde används. Avsänkningen från till exempel ett schakt är som störst i schaktets absoluta närhet och avtar sedan exponentiellt med avståndet. Det innebär att vid influensområdets gräns är avsänkningen teoretiskt sett ofantligt liten och det blir då väldigt svårt att urskilja den antropogena från den naturliga effekten på grundvattennivån. Därför är det mer praktiskt att välja ett avsänkningsvärde, så som 0,3 meter, där det är lättare att bekräfta en avsänkning. En mindre avsänkning än detta är svår att urskilja från naturliga säsongsvariationer av grundvattnet och kan också bedömas ha liten påverkan på omgivningen vilket gör den mindre relevant att bevaka.

2.2 Skyddsobjekt

Det som i stor utsträckning styr var och hur ett schakt får uppföras är närheten till så kallade skyddsobjekt. I det här sammanhanget syftar *skyddsobjekt* på ett objekt som har ett skyddsvärde och som skulle kunna komma att påverkas negativt av en sänkt grundvattennivå; något man måste förhålla sig till vid projektering. SGU (u.å.-a, u.å.-b) redogör för ett antal objekt som bör tas i beaktning vid ansökan om en täktverksamhet, men kan också generellt appliceras på en ansökan om vattenverksamhet som innefattar grundvattenuttag och/eller grundvattenbortledning. Exempel på skyddsobjekt och förknippade konsekvenser en avsänkning kan resultera i:

- **Ekosystem** beroende av yt nära grundvatten. En avsänkning kan begränsa vegetationens tillgång till vatten eller dränera våtmarker.
- **Brunnar**: enskilda och allmänna brunnar kan få försämrade effekt eller i värsta fall sina. Enskilda brunnar kan vara för såväl vattenförsörjning, bevattning eller geoenergi (berg/jordvärme).
- **Infrastruktur**: sättningsskador kan uppkomma om grundvattennivån sänks och portrycket mot till exempel pålar och konstruktioner minskar.
- **Jordbruksmark**: grödor kan få sämre vattentillförsel om grundvattennivån sänks, vilket kan minska skördeavkastningen.

2.3 Schakter

Schakter förekommer i en mängd olika former och i flera olika sammanhang. Som nämnts tidigare fyller de en viktig funktion i vårt samhälle då de tillåter utförande av arbete under markytan. Storleken på schakt kan variera väldigt, från några meter i diameter hos en vägport, till hundratals meter i ett dagbrott för gruvbrytning. Variationer i djupled förekommer givetvis också. Skillnad måste också göras mellan permanenta och tillfälliga schakter. Ett tillfälligt schakt, till exempel för att bygga eller reparera någon typ av underjordisk konstruktion, behöver nödvändigtvis inte utföra någon större inverkan på lokala grundvattennivåer om det endast existerar under en kortare period. Däremot för permanenta schakter måste utgångspunkten vara att schaktet kommer utgöra en beständig inverkan på grundvattenmagasinet om dess botten ligger under grundvattenytan.

Två vanliga varianter av schakter är vägportar och skärningar. De är också de två typerna som kommer att granskas i den här studien. Även om konstruktionerna till viss del skiljer sig åt så måste samma hydrogeologiska synsätt användas då problematiken är den samma.

2.3.1 Vägportar

Vägportar fyller en viktig funktion i vår infrastruktur då de tillåter fordon och gångtrafikanter att passera under högt trafikerade vägar och järnvägar utan att behöva korsas någon trafik, så kallade planskilda korsningar, något som ger en påtaglig ökad trafiksäkerhet (Trafikverket, 2018a). De förekommer både som fordonspassager, gång och cykeltunnlar (så kallade gc-tunnlar) eller som en gemensam kombination av dessa två. För att åstadkomma dessa planskilda korsningar krävs en viss nivåskillnad mellan de båda korsande körbanorna. Istället för att höja upp den ena körbanan ovanför marknivån väljs oftast att gräva ner en körbana och låta den passera under. Det medför dock att betydande mängder material måste schaktas bort för att nå ner till önskat djup och i och med att grundvattenytan på många platser ligger relativt nära markytan hamnar då botten på schaktet under den lokala grundvattenytan. Detta resulterar i ett inläckage till schaktet vilket då måste förses med dränledningar och/eller pumpar för att dränera bort de inläckande vattenmassorna.

2.3.2 Skärningar

En annan konstruktionslösning som brukas inom infrastrukturprojekt är skärningar. Skärningar används vid till exempel en väg- eller järnvägssträcka där körbanan behövs förläggas på lägre nivå än marknivån och där det inte finns något behov av en tunnel. Anledningen kan vara att åstadkomma en rakare sträckning eller för att minska nivåskillnader på sträckningen. En skärning kan göras genom både jordlager och berg men oavsett måste massor sprängas och/eller schaktas bort för att ge utrymme för väg eller järnvägssträckan. Resultatet blir att längs med sträckan löper en slänt, om skärningen går genom jord, eller en brant, om skärningen går genom berg. På samma sätt som vid konstruktionen av ett schakt och en vägport kan det bli nödvändigt att hantera inläckande vattenmassor om botten på skärningen hamnar under grundvattenytan.

2.4 Hydrogeologiska begrepp

2.4.1 Vattenbalans

För att ge en övergripande bild av vattenomsättningen i ett område används ofta en vattenbalans (vattenbudget) och att bestämma de olika termerna i denna balans kan vara till stor hjälp i hydrogeologiska resonemang (Carlsson & Gustafson, 1991). Den grundläggande principen är att det som går in i systemet jämförs med det som lämnar systemet. Tillskott till ett hydrologiskt system sker främst genom nederbörd. En stor del av denna mängd lämnar dock snart systemet genom evaporation och transpiration, ofta sammanslaget och benämnt som evapotranspiration. Den nederbörd som finns kvar efter att evapotranspiration har skett kallas nettonederbörd och räknas som tillskottet till systemet. Detta ställs sedan mot förlust från systemet. Förlust sker främst genom grundvattenavrinning och ytvattenavrinning. Differensen mellan dessa måste då utgöras av en minskning eller ökning i lagringen hos vattenmagasinet. En vattenbalans för ovanstående förhållanden kan skrivas som följande:

$$P - ET = Q_{ut} \pm \Delta S \quad (1)$$

Där P är nederbörd [L/T], ET är evapotranspiration [L/T], Q_{ut} är avrinning [L^3/T] och ΔS är förändring i lagringen hos vattenmagasinet [L^3]. Då den största förändringen i lagringen beror på återkommande säsongsvariationer kan det antas att magasinstermen under långa observationsperioder är försumbar och kan sättas lika med noll (Carlsson & Gustafson, 1991), något som utnyttjas i många hydrogeologiska sammanhang. Exemplet som nämns i det här stycket är en generell och förenklad version av en vattenbalans. Mer avancerade uppställningar med ytterligare beståndsdelar av vattenbalansen beskrivs mer utförligt i till exempel Fetter (2014) och Carlsson och Gustafson (1991).

2.4.2 Grundvattenbildning

Grundvattenbildning sker när vatten som perkolerar genom den omättade zonen når grundvattenytan och bidrar till grundvattenmagasinets lagring. Att kunna bestämma grundvattenbildningen är av stort intresse då den till exempel avgör hur stort grundvattenuttag man kan göra ur en akvifer utan att grundvattenytan sänks på lång sikt. I de förhållanden som råder i Sverige är infiltrationskapaciteten generellt sett större än regnets intensitet (Rodhe, Lindström, Rosberg, & Pers, 2006) vilket innebär att om all nederbörd infiltrerar är grundvattenbildningen lika med nederbörd minus evapotranspiration, alltså nettonederbörden. Det kallas då den potentiella grundvattenbildningen och är den teoretiskt högsta grundvattenbildningen som kan ske. Förhållandet för den potentiella grundvattenbildningen kan följaktligen skrivas så här:

$$P - ET = W \quad (2)$$

Där W är grundvattenbildningen [L/T]. Det ska dock poängteras att den verkliga grundvattenbildningen sällan är likställd den potentiella grundvattenbildningen, utan i själva verket något lägre. Speciellt kan grundvattenbildningen till berg vara betydande mindre än den potentiella grundvattenbildningen (Blomberg, 2015).

2.4.3 Grundvattnets strömning

Grundvattnets strömning styrs av skillnader i tryck, så kallad potentialskillnad. Den totala potentialen för grundvatten i en punkt består av två komponenter: tryckpotential, vattnets tryck i jämförelse med atmosfärstrycket, och lägespotential, nivåskillnaden mellan altituden på grundvattenytan och en vald referenspunkt. Grundvatten flödar alltid från högre totalpotential till lägre totalpotential. Från denna potentialskillnad uppstår en hydraulisk gradienten.

2.5 Hydrogeologiska formler

Vidare utveckling av följande ekvationer och antaganden lägger grunden för beräkningsmetoderna som berörs av den här studien.

2.5.1 Darcys lag

För att beskriva hur en vätska (i det här fallet grundvatten) flödar genom ett poröst medium (akvifer) används Darcys lag, vilken utvecklades av H. Darcy (1856). Lagen säger att flöde genom en sandfylld cylinder är direkt proportionerligt med cylinderns tvärsnittsarea och minskningen av den hydrauliska gradienten. Gradienten beskrivs som skillnaden i grundvattnets trycknivå dividerat med provets längd (Fetter, 2014). Darcys lag skrivs som följande:

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad (3)$$

Där q är specifikt flöde [L/T], Q är flöde [L³/T], A är tvärsnittsarea [L²], K är hydraulisk konduktivitet [L/T] och dh/dl är den hydrauliska gradienten [dimensionslös]. Specifikt flöde, även kallat darcyhastighet, är egentligen inte en riktig hastighet med vilken vattenmolekyler färdas genom akviferen utan är ett flöde per tvärsnittsarea (Krešić, 1997).

Ett antagande som måste göras för att applicera Darcys lag är att flödet i fråga är laminärt, alltså ett flöde längs mjuka, raka och parallella linjer, till skillnad mot turbulent flöde. Sådant är oftast fallet för långsamt flödande grundvatten. Dock kan flödeshastigheten i vissa fall vara så pass hög att turbulent flöde uppstår, till exempel kan det ske i grova sediment i den absoluta närheten till en uttagsbrunn. Överlag är dock dessa situationer inte så vanliga vilket gör att Darcys lag oftast är relevant att använda (Fetter, 2014).

2.5.2 Hydrauliska flödesekvationen

Den generella flödesekvationen för tvådimensionellt flöde i öppna akviferer är känd som Boussinesq ekvationen (Boussinesq, 1904) och beskriver ett homogent och isotropiskt system med transienta förhållanden. Den skrivs som följande:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

Där ∂ är differentialoperatorn, t är tid [T] och S_y är vattenavgivningstalet [dimensionslös] (Fetter, 2014). För ett förhållande i tre dimensioner och jämvikt gäller:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

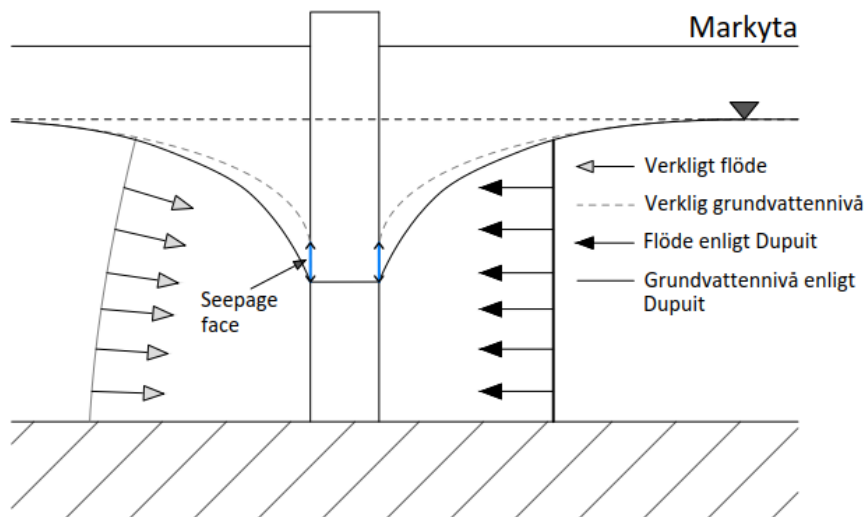
Där noll representerar de oförändrade förhållanden hos akviferens magasinering som råder vid ett jämviktssläge. Ekvation 4 kallas för Laplaces ekvation och beskriver även det ett homogent och isotropiskt system.

2.5.3 Dupuits antagande

Till skillnad från slutna akviferer avgränsas istället öppna akviferer uppåt av dess grundvattentryckyta. Detta innebär att akviferens mättade tjocklek varierar och generellt minskar i flödesriktningen (dvs. gradienten ökar i flödesriktningen) och att flödesriktningen består av både en vertikal och en horisontell komponent, vilket komplicerar beräkningarna. För att bemöta det här problemet gjorde Dupuit (1863) ett antal antaganden som förenklade den konceptuella flödesmodellen och möjliggjorde för enklare beräkningsmetoder (Fetter, 2014). Han utnyttjade det faktumet att grundvattenytans gradient oftast är väldigt liten. De antaganden Dupuit gjorde var:

- Ekvipotentiallinjerna är vertikala
- Flödeshastighetens vektor har endast en horisontell komponent
- Flödeshastigheten är konstant längs med de vertikala ekvipotentiallinjerna

De här antagandena visade sig kunna lösa en mängd olika problem men förenklingen innebär också att resultaten inte fullt speglar de verkliga förhållandena. Skillnaden ökar med gradienten och avvikelserna blir som störst i brunnens absoluta närhet där gradienten är som störst. Grundvattenytan närmar sig faktiskt brunnen tangentiellt ovanför den öppna vattenmassan och bildar en inläckande yta, så kallad "seepage face" (Todd & Mays, 2005). Figur 1 visar förhållandet mellan Dupuits och den verkliga grundvattennivån. Dock är skillnaden oftast marginell och berör främst ytor nära brunnen, den lilla felmarginalen är därför något som accepteras som ett lågt pris för antagandets stora användningsområde. Enligt Bear (1979) ger beräkningsmetoder som utnyttjar Dupuits antaganden tillräckligt tillförlitliga resultat på avstånd $r > 1,5h$ från brunnens centrum, där r är radien från brunnens centrum till en punkt längs grundvattenytan och h är höjden från en referensnivå till samma punkt.



Figur 1: Dupuits antagande.

2.5.4 Brunnsekvationen

En av de första metoderna för att beräkna inflöde till brunnar i öppna akviferer utvecklades av G. Thiem (1906) och har sedan dess legat som grund för efterföljande mer avancerade metoder (Kruseman & De Ridder, 2000). Då metoden bygger på antaganden gjorda av Dupuit har den också kommit att kallas Thiem-Dupuit-metoden. Metoden är applicerbar under förhållanden med horisontella jämviktsflöden i isotropa akviferer. Ekvationen skrivs som följande:

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h_a^2)}{\ln\left(\frac{R}{r_a}\right)} \quad (6)$$

Där H är den initiala grundvattennivån [L], h_a är höjden på tryckvattenytan i anläggningen räknat från schaktets botten (avsänkningen) [L], R är influensradien [L] och r_a är anläggningens radie [L]. Ekvation 6 förekommer också i följande form:

$$H^2 - h_a^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{R}{r_a}\right) \quad (7)$$

En begränsning hos brunnsekvationen är att båda variablerna Q och R i regel är okända vilket gör ekvationen svårlöslig. En metod att bemöta detta beskrivs i nästkommande stycke.

2.5.5 Empiriska och halvempiriska formler för influensradie

Under det senaste århundradet har ett flertal relativt enkla formler tagits fram för att enkelt kunna uppskatta det förväntade influensområdet. En samling av empiriska och halvempiriska formler kan presenteras i tabell 1, sammanställda av Bear och Zaslavsky (1968). Gemensamt för dem alla är att de använder sig av förhållandevis få uppmätta eller uppskattade parametrar för att beräkna influensområdets radie. Detta har gjort dem enkla att applicera och därmed också populära. De används ofta tillsammans med till exempel brunnsekvationen för att utesluta en okänd variabel och på så vis kunna beräkna inflödet. Dock innebär användandet av få parametrar också att resultatet har en större osäkerhet än motsvarande mer avancerade analytiska metoder. Användandet av dessa empiriska formler försvaras ofta med att då R befinner sig inom en logaritmisk term i ekvation 6 och 7 har variationer av den mindre inverkan på Q (Bear & Zaslavsky, 1968; Todd, 1959). Däremot har små variationer på Q stor inverkan på värdet av R . Då den här studien fokuserar på beräkningsmetoder för att bestämma det förväntade influensområdet kommer därför inget fokus läggas på de nedanstående metoderna.

Tabell 1: R är influensradien [L], H är den initiala grundvattennivån [L], W är grundvattenbildningen [L/T], t är tid [T], S är magasincoeffcienten [dimensionslös] och s är avsänkning [L]. *Sichardts formel kallas även ibland för Thurners formel. (Bear & Zaslavsky, 1968)

Författare	Referens	Formel
Halvempiriska formler		
Lembeke	(Lembeke, 1886)	$R = H(K/2W)^{1/2}$
Weber	(Schultze, 1924)	$R = 2,45(HKt/S)^{1/2}$
Kusakin	(Aravin & Numerov, 1953)	$R = 1,9(HKt/S)^{1/2}$
Empiriska formler		
Sichardt*	(Chertousov, 1962)	$R = 3000sK^{1/2}$
Kusakin	(Chertousov, 1949)	$R = 575s(HK)^{1/2}$

3 Områdesbeskrivning

I den här studien har tre olika objekt valts ut som studieområden för de tre utvalda beräkningsmetoderna. Lokalerna har valts ut efter tillgång på hydrogeologiska data, då främst mätserier av grundvattennivåer, och geotekniska data, så som jord- och bergsonderingar. De har även en varierad komplexitet vad gäller de geologiska förhållandena vilket gör att de lämpar sig som studieområden för de olika beräkningsmetoderna.

3.1 Sörmomotet

Sörmomotet är en planskild korsning med vägport och konstruerades i samband med utbyggnaden av E18, sträckan Björkås-Skutberget, cirka 10 km väster om Karlstad (fig. 2). Byggnationen påbörjades september 2015 och vägen öppnades för trafik i juni 2017, dock utfördes merparten av de grundvattensänkande åtgärderna, så som djupa schaktningar, under 2016 (Trafikverket, 2018b). Schaktningen resulterade i två cirka 500 meter långa skärningar som kantar vägbanan. Strax nordväst om platsen ligger Sörmons vattentäkt och Sörmoverket, Karlstads kommuns största vattenverk (Karlstad Kommun, 2016). Där produceras dricksvatten till Karlstads befolkning genom konstgjord infiltration via infiltrationsbassänger. Vägporten är placerad inom Sörmons vattenskyddsområde (WSP, 2015) så för att säkerställa kvalitén på grundvattnet och grundvattenmagasinen skapades ett kontrollprogram för att övervaka bland annat grundvattennivåerna under projekteringen av vägsträckningen. Grundvattenmätningar har utförts i området från strax innan byggstart till augusti 2017 med en mätintensitet på 1–2 gånger per månad (Trafikverket, 2018b).

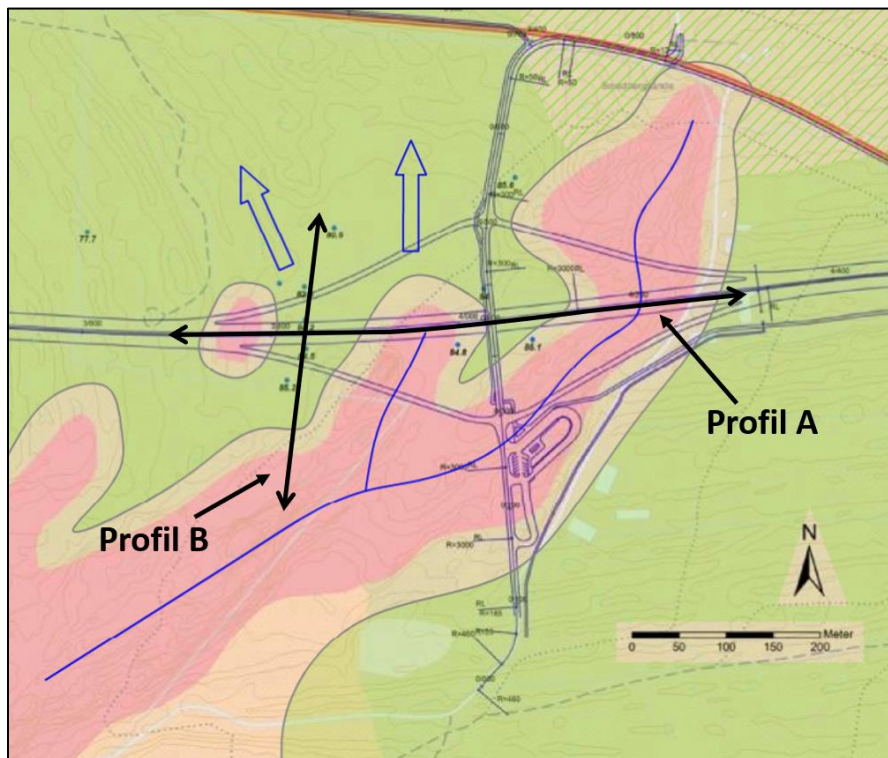


Figur 2: Översiktskarta över Sörmomotet. Observationsrör nyttjade i studien är markerade på kartan. Bakgrundsbild: Google Earth © DigitalGlobe (2019). Inflikad bakgrundskarta: GSD-Terrängkartan © Lantmäteriet (2019b).

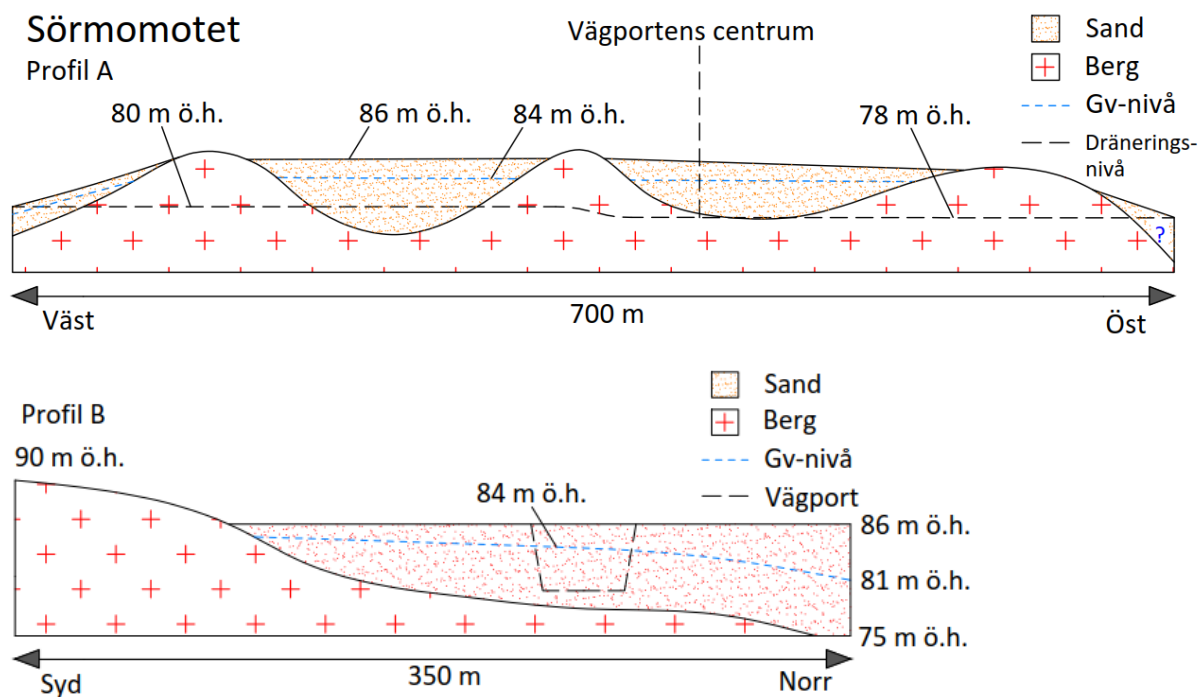
Den lokala berggrunden består av röd till grå gnejs (Vägverket, 2008). På några platser i området går berget i dagen (fig. 3) men utöver det förekommer även några bergribbor längs med vägbanan som inte når upp till markytan. Dessa bergribbor antas ha en sydvästlig-nordostlig riktning (WSP, 2015). Norr och söder om vägsträckningen är det dock osäkert var bergövertytan ligger då där endast finns ett fåtal undersökningspunkter.

Området utgörs främst av sand vilandes på berg och som mest har ett jorddjup på cirka nio meter uppmätts (WSP, 2015). Enligt SGU:s jordartskarta (SGU, 2019b) vilar flygsand ovanpå isälvssediment i området, två skruvborringar utförda av WSP (2015) visar dock på sand hela vägen ner till berggrunden. En tolkning gjord av WSP (2015) menar på att mellan bergribborna förekommer sänkor fyllda med jord, vilka skulle utgöra ett sammanhängande och öppet grundvattenmagasin. Figur 4 visar två konceptuella modeller över de geologiska förhållandena längs med och tvärs vägens profil. Modellerna är baserade på geotekniska och hydrogeologiska data.

Utförda grundvattenmätningar i området har visat på grundvattennivåer mellan 84 och 85,1 m ö.h. och mätningarna pekar mot att grundvattnets strömningsriktning är mot nord/nordväst (WSP, 2015). Efter anläggningen av vägporten ligger den djupaste dräneringsnivån på cirka 78,4 m ö.h. runt vägportens center och strax väster stiger den mot cirka 79.9 m ö.h. (Trafikverket, 2018b).



Figur 3: Geologisk karta över Sörmomotet. Rött representerar berg i dagen, gul-brunt flygsand, Gröna ytor är en uppskattning över utsträckningen av grundvattenmagasinen i området. Det är oklart om det nordvästra magasinet är sammanlänkat med det sydöstra, därav det grön-streckade området. Blå linjer visar ungefärliga grundvattendelare och blå pilar grundvattnets strömningsriktning. Modifierad efter WSP (2015).



Figur 4: Konceptuell modell över de geologiska förhållandena vid Sörmomotet längs med vägbanan. Profil längs med vägbanan. Grundvattennivån i modellen representerar en ungefärlig medelnivå. Grundvattnets nivå öster om profilen är okänd. Figuren är inte skalenlig.

3.2 Falkenberg

Under mitten av 2000-talet drogs järnvägssträckningen förbi Falkenberg om. Från att tidigare ha gått genom Falkenbergs centrala delar går numera järnvägen längs en 13 km lång ny sträcka öster och norr om samhället. Den nya sträckningen, som går mellan Torebo i norr och Heberg i söder, är en del av Västkustbanan. Arbetet på sträckan påbörjades i maj 2005 och trafikering av sträckan har pågått sedan juni 2008 (COWI, 2016a, 2016b, 2016c). Grundvattenmätningar i området har utförts kontinuerligt sedan 1990, då först i enskilda brunnar, och kompletterades 1994 med mätningar i grundvattenrör och bergborrhål (Aqualog, 2010). Kring byggskedet intensifierades mätningarna och antalet mätpunkter utökades. Ett kontrollprogram för att bevaka eventuell påverkan på grundvattnet upprättades och har fortgått även efter driftstart. Längs med den här sträckan har två objekt valts ut som lämpliga för den här studien: en vägport inom delområdet Stafsinge och en skärning längs med delområdet Skrea Backe.

3.2.1 Stafsinge

Rakt norrut från Falkenbergs centrum korsar Västkustbanan väg 154 i en planskild korsning där väg 154 passerar under järnvägen genom en vägport (fig. 5). Anläggningsskedet av delsträckan Stafsinge pågick mellan april 2006 och juli 2007 (COWI, 2016b). Ramperna ner mot vägporten är flacka och längs med dem sträcker sig jordskärningar cirka 200 meter norr- respektive söderut från vägporten. Den exakta dränerande nivån för vägporten är inte känd men bedöms ligga på 4–5 meter under markytan baserat på bilder av anläggningen. Kring Stafsinge är den använda datan främst baserad på geotekniska mätningar från Trafikverket.



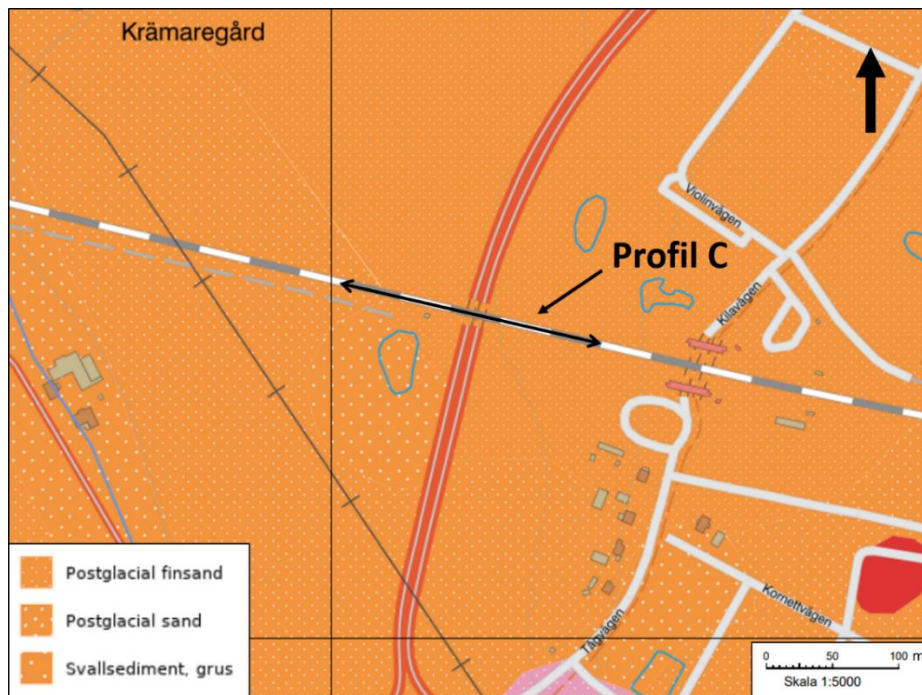
Figur 5: Översiktskarta över Stafsinge. Observationsrör nyttjade i studien är markerade på kartan. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto, 0,25m färg © Lantmäteriet (2019a). Inlagd bakgrundskarta: GSD-Terrängkartan © Lantmäteriet (2019b).

Berggrunden i området består av röd-grå granitisk gnejs, dock går inget berg i dagen i området. Djup till berggrunden är enligt utförda geotekniska undersökningar 3–4 meter där järnvägen korsar vägbanan. Jorddjupet i omgivningen är liknande eller något större, med största uppmätta djup på cirka 6 meter.

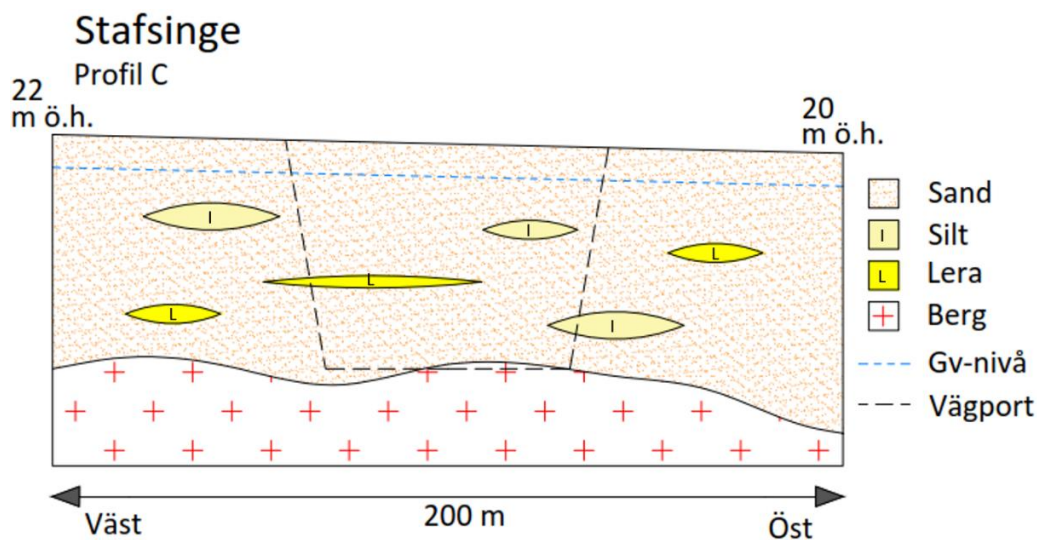
Enligt SGU:s jordartskarta (fig. 6) domineras området av postglacial sand och finsand med inslag av grus (SGU, 2019b). Utförda geotekniska mätningar visar dock på en mer komplex situation där sanden förekommer omväxlande med finare fraktioner av silt och lera. Även sekvenser av grusig sand förekommer. Det är oklart om något sammanhängande lager av lera finns men den inkonsekventa förekomsten av lera pekar mot att det kanske är mer troligt att det rör sig om linser av finare fraktioner än sammanhängande lager. I figur 7 redovisas för de geologiska förhållandena i en konceptuell modell längs med järnvägens profil.

Markytan runt omkring lokalen är väldigt flack men sluttar något åt öster. Vid vägportens centrum är markytans nivå cirka 21 m ö.h. 50 meter väster och 80 meter öster om dess centrum ligger marknivån på 22 respektive 20 m ö.h.

Grundvattennivåerna i området låg innan anläggningsfasen nära eller mycket nära markytan, 0,5 meter under marknivån vid vägportens centrum. Med utgång i grundvattenmätningar går det att säga att den hydrauliska gradienten, och därmed även grundvattenströmningen, troligtvis är riktad åt öster (COWI, 2013). Då inget tätt sammanhängande jordlager har påträffats antas det att öppna förhållanden råder i magasinet.



Figur 6: Geologisk jordartskarta över Stafsinge. Profil C är markerad på kartan. Modifierad efter SGU (2019b).

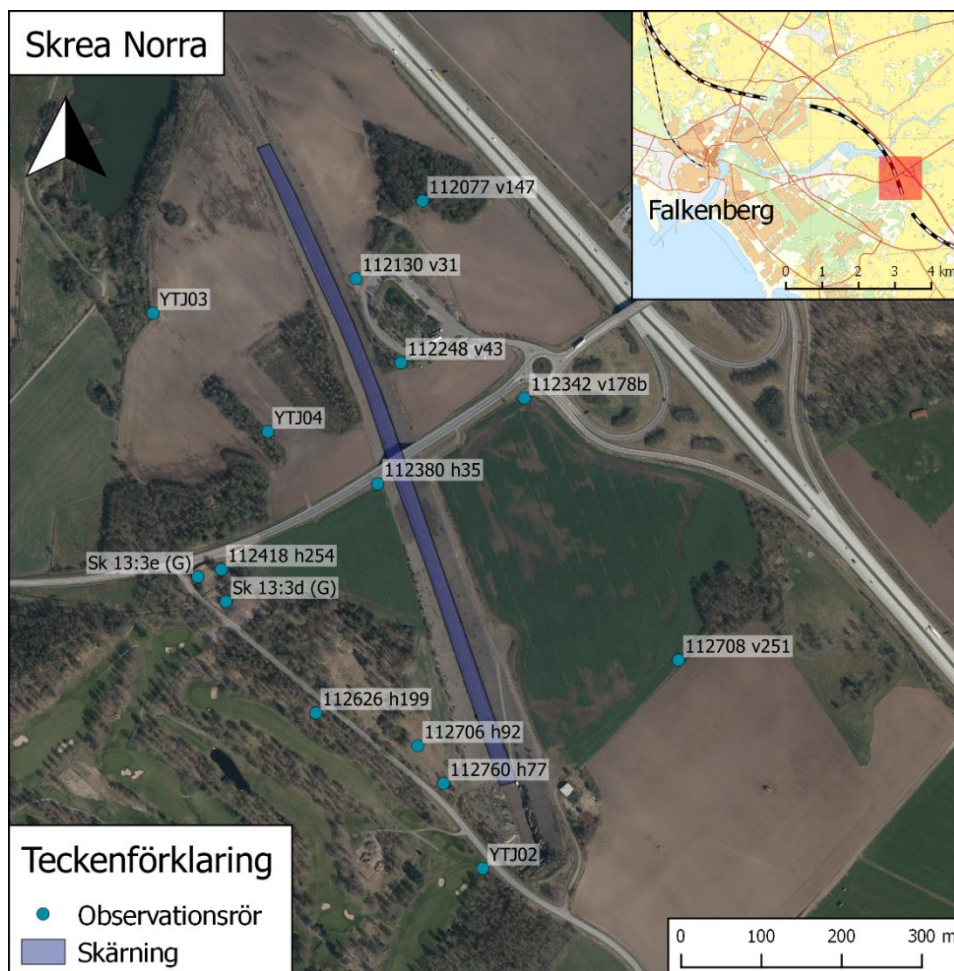


Figur 7: Konceptuell modell över de geologiska förhållandena vid Stafsinge längs med järnvägssträckan. Grundvattennivån i modellen representerar en ungefärlig medelnivå. Figuren är inte skalnlig.

3.2.2 Skrea norra

Skrea backe är en upphöjd bergsrygg lokaliserad drygt 5 km öster om centrala Falkenberg (fig. 8). Ryggen har flacka sidor och höjer sig 50 meter ovanför omgivande terräng. Genom denna bergsrygg går Västkustbanan genom en bergdriven tunnel. Från tunnelns norra mynning sträcker sig en skärning genom jord längs med båda sidor av rälsen och fortsätter cirka 850 meter norrut. Anläggningskedet av delsträckan Skrea Backe pågick mellan juni 2005 och juli 2006 (COWI, 2016a).

Vid byggnationen användes öppna schakt längs med sträckan för att nå ner till önskade marknivåer. Skärningen har som störst djup vid tunnelmynningen där botten av skärningen befinner sig på cirka 17 m ö.h. Sedan minskar dess djup norrut i och med att markytan sluttar och banvallen i stort sätt är horisontell. Markytan i området sluttar svagt mot norr, vid tunnelöppningen ligger marknivån på cirka 35 m ö.h. till att sjunka till runt 20 m ö.h. vid skärningens slut (Ekberg, 2010).

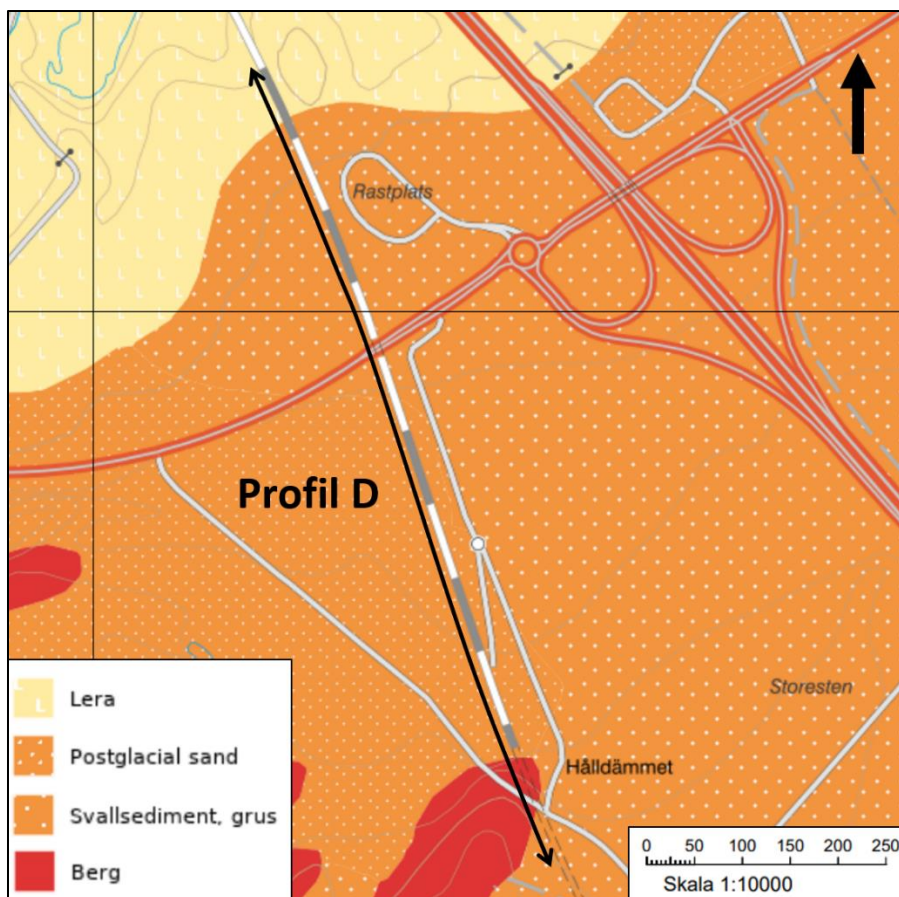


Figur 8: Översiktskarta över Skrea norra. Observationsrör nyttjade i studien är markerade på kartan. Bakgrundsbild: (GSD-Ortofoto, 0,25m färg © Lantmäteriet (2019a). Inflikad bakgrundskarta: GSD-Terrängkartan © Lantmäteriet (2019b).

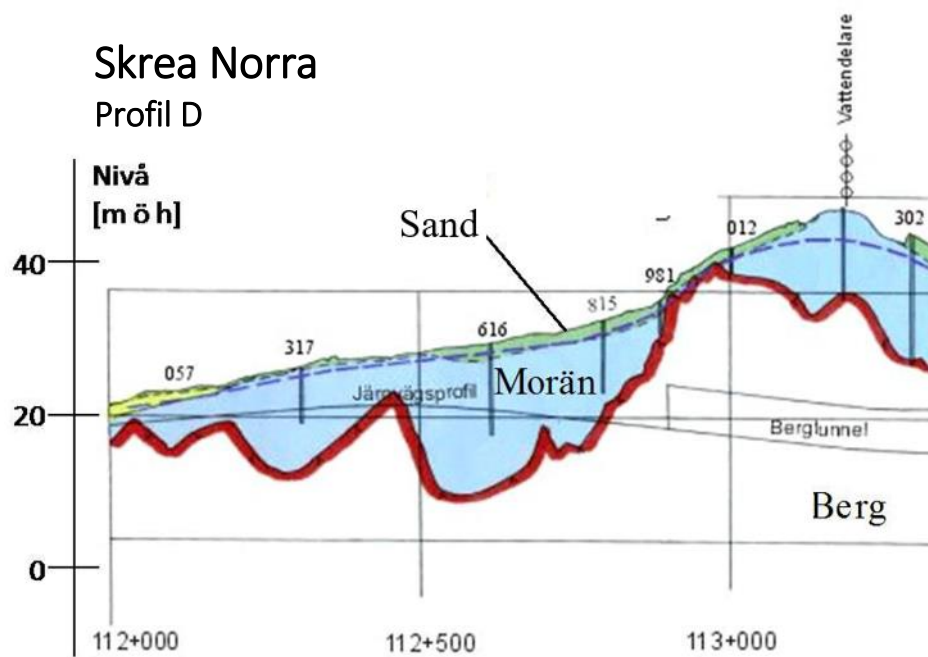
Den lokala berggrunden vid Skrea norra består i huvudsak av röd-grå granitisk gnejs och har en förskifring som sammanfaller med sprickbildningar. Kvaliteten på berget bedöms vara dålig och förekommande sprickzoner bedöms vara vattenförande. Zonernas bredd har uppskattats till 5–15 meter. Utifrån borrade kärnborrhål har ett värde på den hydrauliska konduktiviteten fastslagits till storleksordningen 10^{-8} – 10^{-7} m/s (Ekberg, 2010).

Enligt SGU:s jordartskarta (fig. 9) domineras de ytliga sedimentlagren av postglacial sand och grus (SGU, 2019b). Strax nordväst om skärningen övergår ytlagret i ett område med lera. Berg i dagen återfinns endast precis söder om tunnelmynningen. Längs med skärningen utgörs det översta jordlagret av ett 1–3 meter tjockt sandskikt. Under följer en grusig sandig morän med varierande mäktighet ner mot berggrunden. Jorddjupet är 3–10 meter ett par hundra meter från tunnelmynningen och strax norr om tunnelmynningen är jorddjupet knappt 20 meter (Ekberg, 2010). I rapporten av Ekberg (2010) presenteras en konceptuell modell över de geologiska förhållandena vid Skrea norra (fig. 10).

Ett grundvattenmagasin anses finnas i området och det betraktas som ett öppet magasin. Grundvattenströmningen sker mot norr mot den närliggande ån Ätran. Grundvattenytan följer generellt topografin väl men variationer förekommer och ytan kan återfinnas på mellan 0,2–9 meter under markytan på vissa platser (Ekberg, 2010).



Figur 9: Geologisk jordartskarta över Stafsinge. Profil D är markerad på kartan. Modifierad efter (SGU, 2019b)



Figur 10: Konceptuell modell över Skrea Norra längs med järnvägsprofilen. Modifierad efter Ekberg (2010).

4 Metodbeskrivning

4.1 Analytiska metoder

För att kunna använda någon av de existerande analytiska metoderna krävs att man gör ett stort antal antaganden gällande de hydrogeologiska förutsättningarna. Verkliga grundvattensystem är komplicerade och i stort sett uteslutande heterogena, vilket analytiska beräkningsmetoder inte kan hantera. Därför måste den konceptuella modellen begränsas och förenklas. Här följer en lista på några, men inte alla, vanligt förekommande antaganden som gäller för beräkningsmetoderna som använts i det här arbetet:

- Öppna förhållanden råder i akviferen
- Hela systemet befinner sig i jämvikt
- Akviferen är homogen och isotropisk
- Akviferen avgränsas nedåt mot ett impermeabelt lager och dess horisontella utsträckning är oändlig
- Allt grundvattenflöde är horisontellt och sker radiellt mot brunnen/schaktet (undantaget Todd och Mays metod där flödet endast sker i en dimension)
- Grundvattenbildningen är jämnt fördelad över hela ytan och över tid
- Brunnen/schaktet penetrerar akviferen ända ner till det impermeabla underliggande lagret
- Brunnen/schaktet har en oändligt liten diameter

Antagandet att hela systemet befinner sig i jämvikt innebär att stationära strömningsförhållanden gäller och att utflödet eller grundvattenuttaget är i jämvikt med grundvattenbildningen. Det sker alltså varken någon ökning eller minskning hos lagringen i grundvattenmagasinet.

Vidare följer en genomgång och beskrivning av de tre analytiska beräkningsmetoderna som använts för att beräkna storlek på influensområde och påverkansområde i den här studien.

4.2 Metod 1: Krešić

I Krešić (1997) redogörs för en metod där brunnsekvationen (Thiem-Dupuit-metoden) utvecklats för att även ta hänsyn till grundvattenbildning för att beräkna inläckage. Då inläckaget till en brunn i ett grundvattensystem i jämvikt kan antas genereras helt ifrån infiltration inom brunnens influensområde är grundvattenbildningen högst aktuell att inkludera i beräkningen. En sådan situation kan beskrivas med följande uttryck:

$$Q = R^2 \pi W \quad (8)$$

Där W är grundvattenbildningen [L/T]. Omskrivet kan då influensområdet uttryckas på följande vis när hänsyn tas till grundvattenbildningen:

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi W}} \quad (9)$$

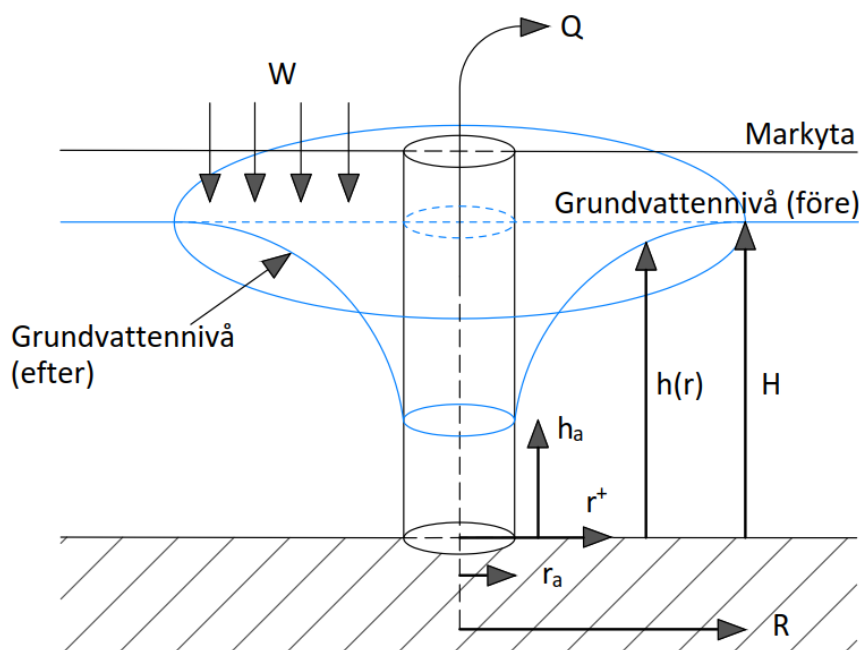
För att kunna lösa ekvation 9 krävs att ett värde för inflödet Q bestäms. För att uppnå det inkluderade Krešić ekvation 9 i brunnsekvationen istället för R , vilket efter korrekt härledning och förenkling ger nedanstående uttryck:

$$H^2 - h_a^2 = \frac{Q}{\pi K} * \left(\ln \frac{\sqrt{\frac{Q}{\pi W e}}}{r_a} \right) \quad (10)$$

Inläckaget kan då beräknas genom att iterera värden på Q tills båda sidor av uttrycket överensstämmer. För en mer grundlig förklaring och fullständig härledning av ekvation 10 hänvisas läsaren till Krešić (1997). Influensområdets radie kan därefter lösas genom ekvation 9. Vidare är det möjligt att bestämma avståndet till en specifik eftersökt avsänkning genom att använda följande ekvation:

$$h(r) = \sqrt{h_a^2 + \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r}{r_a}\right) - \frac{W}{2K}(r^2 - r_a^2)} \quad (11)$$

Där r är avståndet [L] till den eftersökta avsänkningen från schaktets mitt. Avståndet r till eftersökt avsänkning erhålls genom iteration av r . Figur 11 beskriver den analytiska modellen för Krešićs beräkningsmetod.



Figur 11: Analytisk modell över Krešićs beräkningsmetod. h_a kan ansättas som noll för att beskriva ett dränerage till anläggningens botten.

4.3 Metod 2: Marinelli och Niccoli

Precis som Krešić (1997) tar metoden utvecklad av Marinelli och Niccoli (2000) också hänsyn till grundvattenbildningen. Något som dock skiljer den från Krešićs är att den inte endast räknar med ett horisontellt inflöde från schaktets sidor utan även inkluderar ett vertikalt inflöde ifrån schaktets botten. Vanligtvis antas att dagbrottets botten utgörs av ett impermeabelt lager genom vilket inget grundvatten flödar, detta i ett steg att förenkla den konceptuella modellen. Däremot i fall då dagbrottets diameter är betydligt större än dess djup kan en ansenlig del av inläckaget komma ifrån schaktets botten. För att bemöta detta tog Marinelli och Niccoli (2000) fram en beräkningsmetod som tar hänsyn även till vertikalt inflöde. De delade upp inflödet till två zoner: zon 1 berör området från markytan ner till schaktets botten där inflödet sker från sidorna; zon 2 berör schaktets botten där inflödet sker underifrån. Metoden förutsätter att inget grundvattenflöde sker mellan de två zonerna. Följande ekvation beskriver då det totala inflödet:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad (12)$$

Där Q_t är det totala inflödet [L^3/T] och Q_1 och Q_2 är inflödet från zon 1 respektive zon 2 [L^3/T]. Inflödet från zon 1 kan sedan beskrivas enligt följande:

$$Q_1 = W\pi(R^2 - r_a^2) \quad (13)$$

Vilket är identiskt med ekvation 8 bortsett från att infiltrationsområdet har subtraherats med anläggningens area. I Krešićs fall, då situationen ursprungligen gäller en brunn, är r_a^2 försumbar då kvadraten av brunnsradien är betydligt mindre än kvadraten av influensradien (R^2) (Krešić, 1997). Däremot, i Marinelli och Niccolis fall, är det av relevans att inkludera r_a^2 då de beskriver en anläggning med betydligt större radie. Med utgång i ekvation 13 gäller även följande ekvation:

$$H = \sqrt{h_a^2 + \frac{W}{K} \left[R^2 \ln\left(\frac{R}{r_a}\right) - \frac{R^2 - r_a^2}{2} \right]} \quad (14)$$

Där K_h är den horisontella hydrauliska konduktiviteten [L/T]. Influensradien kan sedan beräknas genom att iterera värden på R till att båda sidor av uttrycket överensstämmer. För att bestämma avståndet till en eftersökt grundvattenavsänkning kan ekvation 15 användas.

$$h(r) = \sqrt{h_a^2 + \frac{W}{K} \left[R^2 \ln\left(\frac{r}{r_a}\right) - \frac{r^2 - r_a^2}{2} \right]} \quad (15)$$

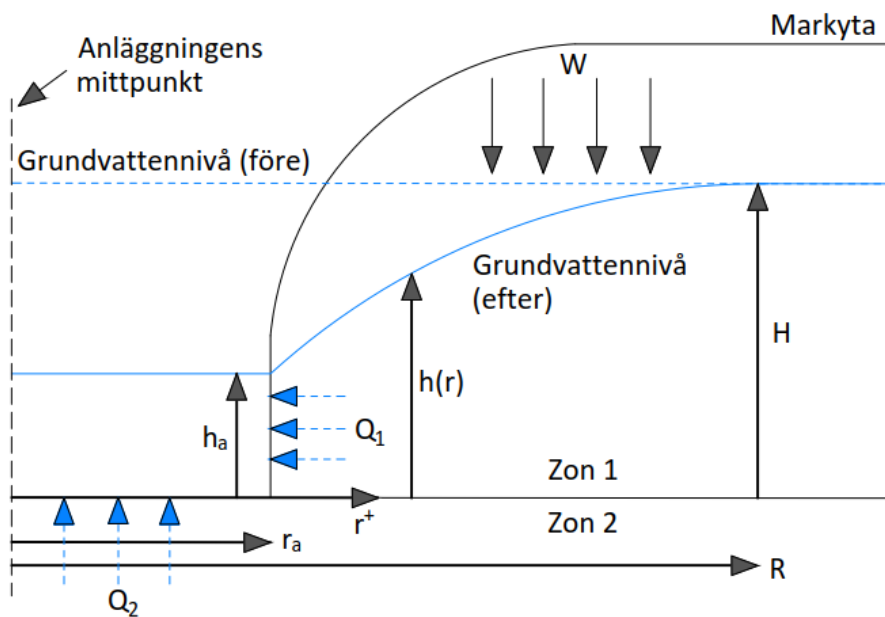
Där avståndet till den eftersökta avsänkningen bestäms genom att iterera värden på r . Inflödet från zon 2 kan vidare beskrivas genom följande ekvation:

$$Q_2 = 4r_a \left(\frac{K}{m}\right) (H - h_a) \quad (16)$$

Där $H-h_a$ är avsänkningen [L] och m är den anisotropiska parametern [dimensionslös]. Uttrycket $(H-h_a)$ refererar till fall då en sjö bildats på botten av dagbrottet, där h_a är höjden på tryckvattenytan över dagbrottets botten. Marinelli och Niccolis metod är framför allt utvecklad för att beräkna inflöde till dagbrott med en befintlig sjö men är enligt de själva även applicerbar på fall där ingen sjö existerar i dagbrottet (Marinelli & Niccoli, 2000). I de fall som tas upp i den här rapporten är bottarna på schakten väl-dränerade och alltså finns det ingen möjlighet för bildning av någon vattenansamling, därför kan h_a uteslutas ur ekvation 16. Med ekvation 16 är det möjligt att ta hänsyn till anisotropi i zon 2. Genom ekvation 17 går det att inkludera olika värden för horisontal och vertikal hydraulisk konduktivitet, vilket kan vara angeläget då den vertikala hydrauliska konduktiviteten ofta är lägre än den horisontella. Ekvationen ser ut som följande:

$$m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (17)$$

Där K_h och K_v är den horisontella respektive vertikala hydrauliska konduktiviteten. Figur 12 beskriver den analytiska modellen för Marinelli och Niccolis beräkningsmetod.



Figur 12: Analytisk modell över Marinelli och Niccolis beräkningsmetod. h_a kan ansättas som noll för att beskriva ett dränering till anläggningens botten.

4.4 Metod 3: Todd och Mays

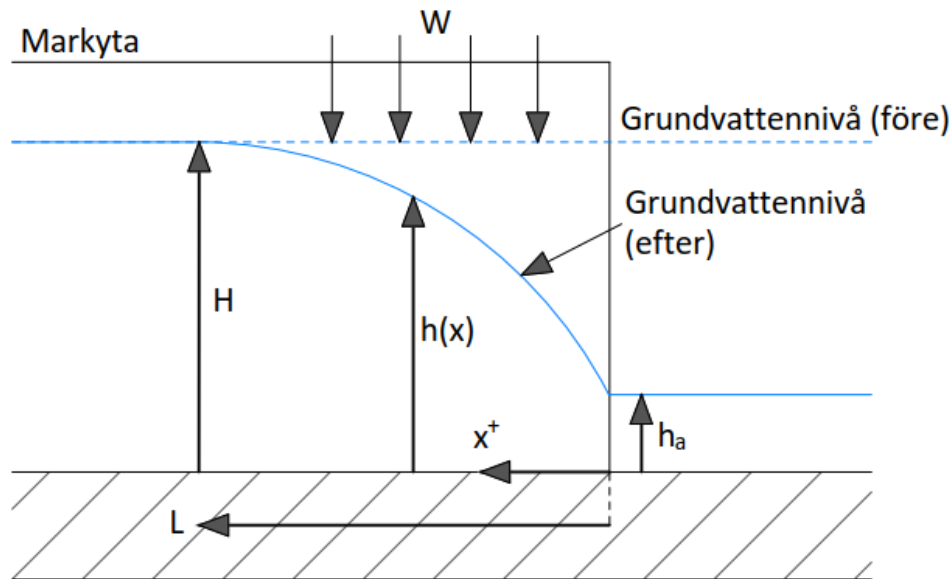
Beräkningsmetoden tagen från Todd och Mays (2005) skiljer sig från de resterande metoderna på så sätt att den behandlar grundvattenflöde i endast två dimensioner, jämfört med de övriga metoderna som beskriver situationer med radiellt flöde i tre dimensioner. Metoden tillämpas oftast i situationer där grundvattenpåverkan från en långtgående skärning, anläggning eller dike ska beräknas till skillnad från en brunn eller ett schakt. Även den här metoden hanterar ett öppet grundvattensystem vilket avgränsas underifrån av ett impermeabelt lager och tar precis som Krešić samt Marinelli och Niccoli hänsyn till grundvattenbildningen. Följande ekvation kan användas för att beräkna influensavståndet:

$$L = \sqrt{\frac{K}{W}(H^2 - h_a^2)} \quad (18)$$

Där L är avståndet till influensområdets gräns [L]. Anledningen till att L används istället för R för att beskriva avståndet till influensområdets gräns är för att det här rör sig om en sträcka och inte en radie. Något som skiljer Todds och Mays metod från Krešićs samt Marinelli och Niccolis metoder och som är värt att nämna är att influensavståndet här mäts ifrån anläggningens kant istället för från dess mittpunkt, vilket beror på att metoden berör ett endimensionellt flöde och inte ett radiellt. Vidare kan ekvation 19 användas för att bestämma avståndet till en eftersökt grundvattenavsänkning.

$$h(x) = \sqrt{\frac{W}{K}(2Lx - x^2) + h_a^2} \quad (19)$$

Där x är avståndet från schaktets yttre gräns [L]. Avståndet x till eftersökt avsänkning erhålls genom att iterera värden på x till båda sidor av uttrycket stämmer överens. Figur 13 beskriver den analytiska modellen för Todd och Mays beräkningsmetod.



Figur 13: Analytisk modell över Todd och Mays beräkningsmetod. Notera att influensavståndet inte mäts från anläggningens mittpunkt utan från dess kant. h_a kan ansättas som noll för att beskriva ett drainage till anläggningens botten.

4.5 Sammanfattning analytiska modeller

Sammanfattningsvis har de tre nämnda analytiska beräkningsmetoderna, Krešić, Marinelli och Niccoli samt Todd och Mays, valts ut för att användas vidare i studien. De anses hålla rätt nivå vad gäller komplexitet, är inte framtagna utifrån empiriska observationer och är vanligt förekommande inom branschen (SGU, 2019a). De är också de tre metoder som beskriver förhållanden i öppna grundvattenmagasin som valts ut och inkluderats i SGU:s handledning. Det ska dock tilläggas att i SGU:s handledning används en kombination av Krešićs och Marinelli & Niccolis metoder där Krešićs används för att beräkna inflöde från sidorna och Marinelli & Niccolis för att beräkna inflöde från botten. I den här studien har däremot beräkningsmetoderna från originalkällorna använts. Utöver dessa tre metoder finns det ytterligare analytiska beräkningsmetoder som beräknar influens- och påverkansområde, två av dessa beskrivs till exempel av Gustafson (2009) respektive Huisman (1972).

Det generella arbetsflödet ser liknande ut för alla tre modeller. Inledningsvis bestäms de parametrar som är nödvändiga för inledande ekvationer, så som hydraulisk konduktivitet (K), ursprunglig grundvattenyta (H), tryckvattenyta i anläggningen/schaktet (h_a), anläggningens/schaktets radie (r_a) och grundvattenbildning (W). Utifrån dessa parametrar beräknas sedan influensområdets utsträckning, i vissa fall genom iterationsmetoder. Med ett värde på influensområdet är det sedan möjligt att beräkna avståndet till en specifik eftersökt avsänkning, till exempel en avsänkning på 0,3 meter, för att definiera ett påverkansområde.

För en mer grundlig härledning av respektive beräkningsmetods ekvationer hänvisas läsaren till originalkällorna som nämns i texten.

4.6 Antaganden och osäkerheter

I och med att grundvattnet befinner sig just under markytan är det i majoriteten av alla fall besvärligt att anskaffa information om rådande hydrogeologiska förhållanden. Då grundvatten aldrig går att observera direkt okulärt används andra undersökningsmetoder för att erhålla data, till exempel genom observationsrör och provpumpningar. Dock är de flesta grundvattensystem väldigt komplexa och vissa parametrar går aldrig att fastställa; osäkerheter kommer alltid att kvarstå. Vad som då krävs för att

genomföra en hydrogeologisk undersökning är att flera förenklingar och antaganden måste göras för att möjliggöra för beräkningar och beslutstagande. Val av antaganden och parametrar har en stor inverkan på slutresultatet, vilket innebär att det är av stor vikt att det är rätt val som görs.

4.6.1 Antaganden och förenklingar

Då i stort sett alla grundvattensystem är heterogena måste som sagt antaganden och förenklingar göras. Den förenklade bilden av verkligheten som målas upp kallas vanligtvis för konceptuell modell. I det här stycket beskrivs några vanliga antaganden men en mer komplett redogörelse över vilka antaganden som gjordes för beräkningarna i den här studien återfinns i stycke 4.1.

För att möjliggöra för framförallt analytiska beräkningsmetoder görs ofta antagandet att akviferen i fråga är *homogen* och *isotrop*, alltså att akviferen har samma egenskaper i alla dess punkter och inga förändringar sker i varken x-, y- eller z-led (Fetter, 2014).

Ett annat grundläggande antagande som måste göras är om akviferen befinner sig i ett *öppet* eller *slutet* tillstånd. Ett sandlager som ligger under ett ytligt lerlager kan anses utgöra en sluten akvifer då lerans låga hydrauliska konduktivitet inte tillåter någon nämnbar genomströmning av vatten. Utan det överliggande lerlagret är lagret av sand i direktkontakt med atmosfären och klassas då som en öppen akvifer (Fetter, 2014). Tyvärr är det dock sällan så här enkelt i verkligheten och vanligtvis placerar sig en akvifer någonstans mellan dessa två extremer. Den kan då beskrivas som en *läckande* akvifer. Vidare är själva begreppen "öppen" och "sluten" akvifer relativa och är beroende av vad den överliggande jordarten är. Detta gör det till något av en tolkningsfråga. Då valet av analytisk beräkningsmetod baseras på, bland annat, om akviferen i fråga är öppen eller sluten, är det uppenbart att detta är av betydelse.

4.6.2 Osäkerheter

Beräkningsmetoderna för att uppskatta influensområde kräver vissa indata för att kunna generera ett resultat. Vissa värden är relativt enkla att fastställa, exempelvis grundvattennivåer och brunnens eller anläggningens radie. Andra värden däremot, så som den hydrauliska konduktiviteten och grundvattenbildningen, kan vara betydligt svårare att bestämma med säkerhet.

Den hydrauliska konduktiviteten (K) bestäms oftast utifrån siktprover eller genom analys av pump- eller slugtester. Då hydrogeologiska system i stor utsträckning är heterogena kommer de här värdena med en viss osäkerhet. Tidigare studier (Blomberg, 2015; Håkansson, 2017; Ragvald, 2012) påstår samtliga att just den hydrauliska konduktiviteten är den parameter som har störst inflytande på analytiska beräkningsmetoder. En magnitud större eller mindre kan ha stor effekt på resultatet. Att med så stor säkerhet som möjligt kunna bestämma konduktiviteten är alltså av största angelägenhet.

Ytterligare en parameter som kan vara problematisk att uppskatta är den lokala grundvattenbildningen (W). Som nämnt tidigare grundar sig grundvattenbildningen i nederbördsdata och uttrycks vanligtvis som nederbörd minus evaporation och transpiration, nettonederbörd. I själva verket kan den verkliga grundvattenbildningen vara lägre än den potentiella grundvattenbildningen, något som kan vara svårt att ta hänsyn till vid beräkning.

Vidare kan även anläggningens radie (r_a) innebära viss problematik. Brunnsekvationen bygger på antaganden för just en brunn, vilka har en relativt liten radie jämfört med till exempel en vägport. Vidare kan det också vara svårt att avgöra vad som är ett rimligt värde för radie om anläggningen inte är cirkulär, vilket i stort sett aldrig är fallet för ett schakt. För ett schakt där förhållandet mellan längden och bredden förhåller sig som 1:1 är det enkelt att hävda att den ekvivalenta radien är representativ. Men i fall där längden är betydligt större än bredden kan det vara svårare att argumentera för det samma.

4.7 Använda data

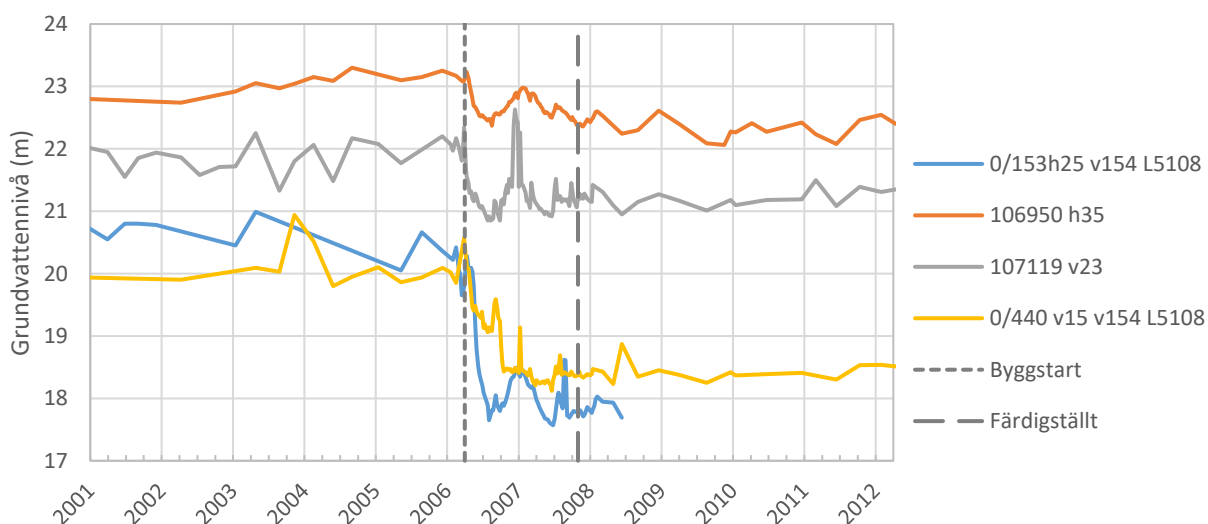
4.7.1 Grundvattennivåer

För att få en översiktlig bild över hur grundvattensituationen ser ut vid de olika lokalerna har mätserier över grundvattennivåer analyserats. Av intresse är att jämföra grundvattennivåer innan projektering med de efter genomförande, för att på så vis granska om någon avsänkning relaterad till schaktarbete har ägt rum. Data från de tre lokalerna har erhållits från olika källor och har skilda temporala utsträckningar.

Mätningarna kring Sörmomotet har utförts av WSP (2015) och tillhandahållits av Trafikverket. Mätningarna påbörjades några månader innan byggnationen startade och avslutades strax efter projektets färdigställande.

Vad gäller grundvattenmätningarna vid Stafsinge och Skrea norra har de utförts av bland annat COWI (2013, 2016a) och tillhandahållits av COWI samt Norconsult. Mätningarna här har pågått under betydligt längre tid än vid Sörmomotet, med vissa mätningar utförda redan i början av 90-talet. Kontrollprogrammet upprättat i samband med projekteringen har medfört att grundvattennivåer även fortsatt har mätts flera år efter järnvägssträckans färdigställande. Detta ger ett väldigt bra underlag för att bestämma ursprungliga grundvattennivåer och eventuell beständig påverkan från schaktverksamhetens avsänkningar.

Ett antal grafer över grundvattennivåer från de olika lokalerna har sammanställts för att beskriva utvecklingen av grundvattensituationen. En av dessa grafer återfinns här nedanför (fig. 14) som ett exempel och visar grundvattenserier från några utvalda grundvattenrör från lokal Stafsinge. Resterande mätserier från återstående lokaler återfinns i appendix. I graferna visas också byggstart och färdigställningsdatum för projekten, vilka beskriver när byggnationen av sträckningen påbörjades och avslutades. Det grundvattensänkande schaktverksarbetet har ägt rum någon gång inom det tidsförloppet men de exakta datumen för detta är okända.



Figur 14: Utvalda grundvattenmätserier från lokal Stafsinge där tydlig påverkan från anläggningsfasen kan urskiljas.

4.7.2 Avsänkningar

För att undersöka eventuella grundvattenavsänkningar vid de olika lokalerna har grundvattennivåer från innan byggnationen påbörjades jämförts med nivåer efter byggnationens slutförande.

För lokal Sörmomotet har avsänkningsvärden tagits från en rapport producerad av WSP (Trafikverket, 2018b). Flera av mätserierna från det projektet sträcker sig som nämnt från endast några månader innan byggstart till strax efter projektets färdigställande. Det medför att det blir svårare att korrekt bedöma någon ursprunglig grundvattennivå samt situation efter färdigställande. För att hantera detta använde sig WSP av mätserier från närliggande referensrör för att kunna urskilja antropogen påverkan på grundvattnet från naturlig. För vissa korta mätserier har även korrektion mot andra närliggande grundvattenrör utförts för att på så vis förlänga mätserien. De för Sörmomotet publicerade avsänkningsvärdena för relevanta grundvattenrör redovisas i tabell 2.

Tabell 2: Förändring av grundvattennivåer i grundvattenrör vid lokal Sörmomotet från före byggnation jämfört med efter färdigställande. Värden är tagna från Trafikverket (2018b).

Sörmomotet			
Grundvattenrör	Avsänkning (m)	Grundvattenrör	Avsänkning (m)
382515GW	-2,2	GW3600	+0,1
GW1506b	+0,2	GW3900	-1,2
GW1507	-0,4	PH1	-0,1

För lokalerna Stafsinge och Skrea norra har avsänkningsvärden tagits fram specifikt för den här studien. Beräkningarna här grundar sig i årsmedelvärden från de olika grundvattenrören. I första hand har år representerade av mätningar under alla säsonger använts för att generera medelvärden, dock har i vissa fall kortare mätperioder utnyttjats vid avsaknad av längre sammanhängande mätserier. Beräknade avsänkningsvärden för relevanta grundvattenrör redovisas i tabell 3 och 4.

I fall då en grundvattenförändring på mindre än 0,3 meter har uppmätts har bedömningen gjorts att ingen tydlig avsänkning går att urskilja och grundvattenröret ifråga har då ansetts vara opåverkat. Värdena har avrundats till en decimal.

Tabell 3: Förändring av grundvattennivåer i grundvattenrör vid lokal Stafsinge från före byggnation jämfört med efter färdigställande.

Stafsinge			
Grundvattenrör	Avsänkning (m)	Grundvattenrör	Avsänkning (m)
0/153h25 v154 L5108	-2,7	107503 v36	±0,0
0/440 v15 v154 L5108	-1,6	Sta 5:8a (G)	-0,2
106950 h35	-0,6	Trö 17:1 (B)	+0,2
107119 v23	-0,7	Trö 18:3	+0,1
107325 h70	-0,1		

Tabell 4: Förändring av grundvattennivåer i grundvattenrör vid lokal Skrea norra från före byggnation jämfört med efter färdigställande.

Skrea norra			
Grundvattenrör	Avsänkning (m)	Grundvattenrör	Avsänkning (m)
112077 v147	-0,1	112708 v251	+0,5
112130 v31	-3,8	112760 h77	-1,5
112248 v43	-2,8	Sk 13.3e (G)	+0,1
112342 v178b	-0,1	Sk 13:3d (G)	-0,1
112380 h35	-4,6	YTJ02	+0,1
112418 h254	±0,0	YTJ03	+0,2
112626 h199	+0,5	YTJ04	-0,2
112706 h92	-0,4		

4.7.3 Influens- och påverkansområden

För all tre lokaler har tidigare hydrogeologiska undersökningar redovisat influens- och/eller påverkansområden baserade på uppmätta avsänkningar. Områdena presenteras i kartor under resultatdelen, avsnitt 5.2.

I rapporten framställd av WSP och publicerad av Trafikverket (2018b) redovisas ett påverkansområde för en maximal avsänkning på 0,3 meter gällande vägporten vid Sörmomotet. Området är baserat på uppmätta grundvattennivåer presenterade i tabell 2, tillsammans med en hydrogeologisk tolkning av området.

Ett influensområde för lokal Stafsinge har publicerats av COWI (2013). Hur området tagits fram redovisas inte i rapporten, endast att det grundar sig i uppmätta grundvattenavsänkningar. Den enda ytterligare informationen som finns är att området är baserat på avsänkingsnivåer uppmätta under perioden april till maj 2011. I rapporten av COWI har även delar av järnvägssträckan väster om lokal Stafsinge ingått i grundvattenutredningen, därför sträcker sig det av dem uppskattade influensområdet också västerut längs med banvallen.

Vad gäller Skrea norra har ett påverkansområde för en maximal avsänkning på 0,3 meter tagits fram av Ekberg (2010). Samma mätserier som presenteras i den här studien (appendix 10.3) har även använts av Ekberg. Årsmedelvärden har använts för att etablera opåverkade och påverkade grundvattennivåer. För avsänkingsvärden har ett årsmedelvärde från juni 2006 till juni 2007 använts. Avsänkningarna har sedan interpolerats med hjälp av programvaran SURFER för att generera ett påverkansområde (Ekberg, 2010).

4.8 Tillämpning av beräkningsmetoder

De tre analytiska beräkningsmetoderna har alla applicerats på de tre lokalerna Sörmomotet, Stafsinge och Skrea norra. Inga platsbesök till lokalerna har genomförts och informationshämtning har begränsats till tidigare publicerad information och andra anskaffningsmetoder, till exempel från satellitbilder, jordartskartor och data från geotekniska undersökningar. I stor utsträckning har parametervärden och information redovisad i COWI (2013), Ekberg (2010) och WSP (2015) använts för att tolka lokalerna och utföra beräkningarna. I nästkommande stycken beskrivs vilka parametervärden som använts vid beräkningarna för de olika lokalerna. I alla fall har tryckvattenytan (h_a) satts till noll då samtliga anläggningar är dränerade ner till respektive botten.

4.8.1 Sörmomotet

I Trafikverket (2018b) nämns det att det vid Sörmomotets vägport finns två aktuella dräneringsnivåer, 78,4 m ö.h. vid vägportens centrum och 79,9 m ö.h. strax väster om dess centrum. Därför har området delats upp i två sektioner där olika avsänkingsvärden har använts för att bättre representera den verkliga situationen. En östlig och en västlig sektion där avsänkningar på 5,6 respektive 4 meter har använts. En grundvattenbildning på 230 mm/år, likväl en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-4}$ m/s, har använts för båda sektionerna och är samma värden som använts av WSP (2015). Den hydrauliska konduktiviteten stämmer väl överens med tillgängliga jordartskartor över området och representerar ett vanligt förekommande värde satt för sand. Grundvattenbildningen är baserad på referensdata för årsnederbörd och årsavdunstning från SMHI (WSP, 2015). Som anläggningens radie ansattes ett värde på 15 meter, vilket är halva anläggningens bredd.

4.8.2 Stafsinge

Vid Stafsinge fanns ingen känd dräneringsnivå, där sattes ett avsänkingsvärde på 4,5 meter baserat på den ursprungliga grundvattennivån och anläggningens uppskattade djup. Trots förekomst av både silt och lera har den hydrauliska konduktiviteten satts till $1 \cdot 10^{-4}$ m/s då inga sammanhängande lager

med finare fraktioner påträffats och sand bedöms därför utgöra det dominerande mediet. Grundvattenbildningen har satts till 456 mm/år och är hämtad från Ekberg (2010). Ekberg beskriver egentligen förhållandena vid Skrea norra men med tanke på lokalernas ringa avstånd ifrån varandra, endast cirka fem kilometer, kan det antas vara representativt även vid Stafsinge. Värdet på 456 mm/år är baserat på SMHI:s HBV-modell och är likvärdigt med nettonederbörden. Ett värde på 7,5 meter har ansatts som anläggningens radie, vilket är halva anläggningens bredd.

Vägporten vid Stafsinge är utformad så att djupet är som störst vid dess centrum för att sedan avta upp längs med ramperna mot sidorna. Det samma är då sant även för avsänkning i anläggningen. På grund av det här har en beräkning gjorts utifrån anläggningens mittpunkt med ett avsänkningsvärde på 4,5 meter och därefter har flertalet beräkningar även gjorts från mittpunkten ut mot båda sidorna med gradvis minskande avsänkningsvärde. Avsänkning har antagits avta linjärt till ett avstånd på 200 meter där ingen avsänkning antas ha skett. Detta har gjorts för att ge ett mer representativt influens- och påverkansområde.

4.8.3 Skrea norra

Ett liknande resonemang har förts för Skrea norra som för Stafsinge där flera uträkningar har gjorts längs med skärningens sträckning. Ett avsänkningsvärde på 18 meter sattes vid skärningens södra ände, strax intill tunnelmynningen, för att sedan avta linjärt ner till noll vid skärningens norra ände. Ett värde på $1 \cdot 10^{-5}$ m/s har satts som hydraulisk konduktivitet baserat på värden ur Ekberg (2010) samt jordartskartor och geotekniska undersökningar. Ett värde på 456 mm/år har använts för grundvattenbildningen och är taget från Ekberg (2010). Anläggningens radie har ansatts till 10 meter, vilket är halva anläggningens bredd.

4.9 Metodjämförelse

För att kunna jämföra de olika analytiska beräkningsmetoderna med varandra och undersöka hur de reagerar på de olika parametrarna har ytterligare beräkningsförsök utförts. För de här testerna har dels parametervärden från de olika testlokalerna används. Dock täcker inte lokalerna hela det spektrum av parametrarnas storleksordningar som är av intresse för att kunna jämföra metoderna. Därför har även fiktiva värden ansatts i vissa lägen för att på så sätt kunna undersöka hur beräkningsmetoderna beter sig i situationer olika dom vid testlokalerna. Fokus har här legat på parametrarna anläggningsradie (r_a) och hydraulisk konduktivitet (K) och hur de påverkar den resulterande influensradien. Då Todd och Mays metod inte använder sig av anläggningsradien har den inte kunnat ingå i vissa jämförelser.

5 Resultat

I följande avsnitt presenteras beräkningsresultaten från de tre analytiska beräkningsmetoderna. Avsnittet har delats upp i två delar. I den första delen redovisas resultaten där metoderna har tillämpats på de tre studieområdena och en jämförelse mellan beräknade och uppmätta avsänkingsområden. I den andra delen redovisas en jämförelse av metoderna och hur de svarar på förändringar av de olika parametrarna.

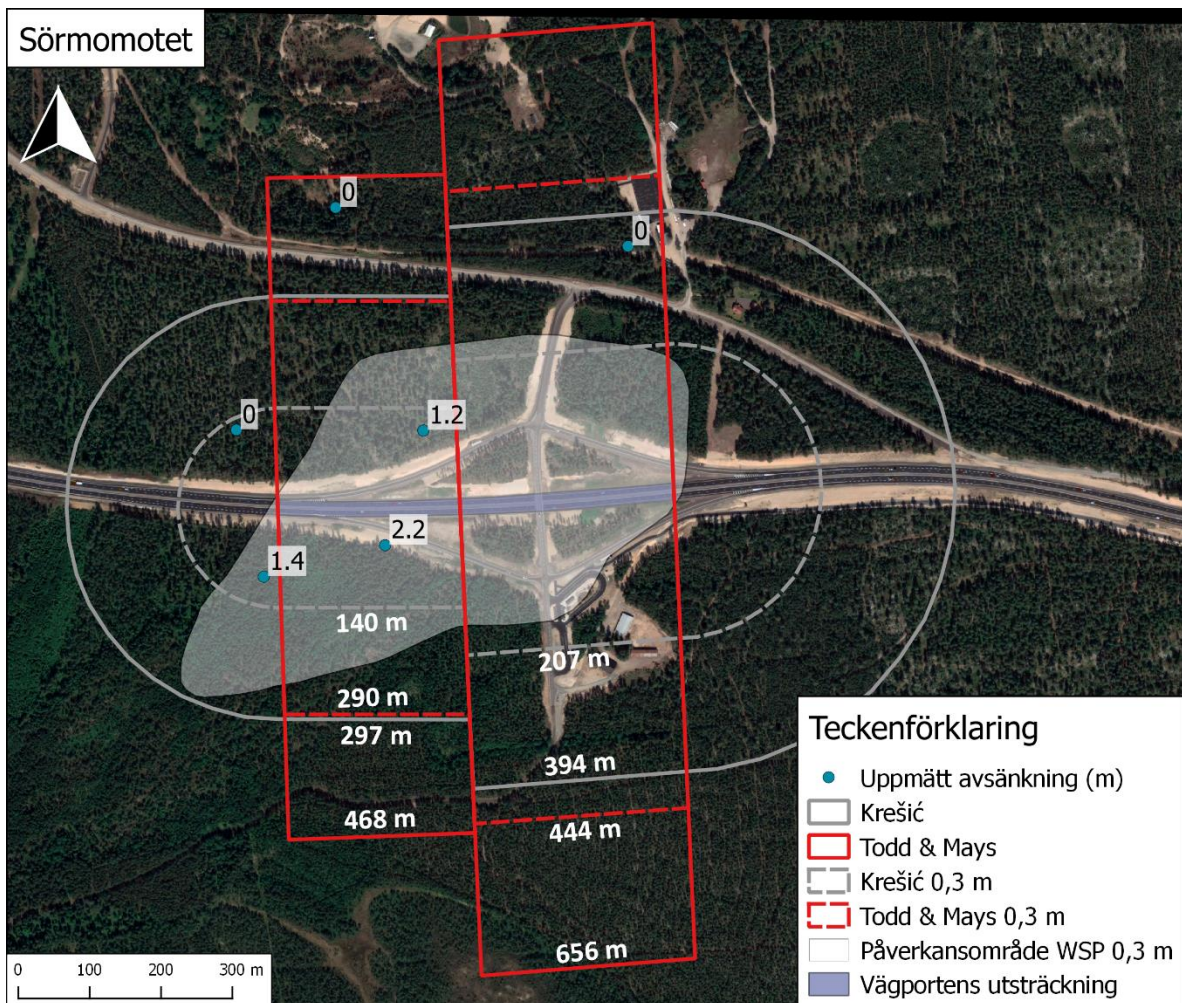
5.1 Beräkningsresultat och jämförelse med uppmätta grundvattennivåer

I följande stycken presenteras beräkningsresultaten från de tre analytiska metoderna tillämpade på de tre studieområdena. För varje område jämförs även beräkningsresultaten med uppmätta avsänkingsnivåer och uppskattade influens- och påverkansområden framtagna för respektive områden. Här har resultaten från Marinelli och Niccolis metod valts att uteslutas från kartorna då de uppvisar närmast identiska resultat som Krešićs metod och följaktligen sammanfaller deras influens- och påverkansområden. Beräkningsresultaten från Marinelli och Niccolis metod går dock att utläsa ur tillhörande tabeller. De framställda områdena presenterade i kartorna har olika utformning på grund av att metoderna behandlar grundvattenflödet olika. Krešić beskriver ett radiellt flöde i tre dimensioner medan Todd och Mays beskriver ett flöde i endast två dimensioner. Därför antar områdena, baserat på de varierande lokala antagandena, flera olika utseenden.

5.1.1 Sörmomotet

Vid Sörmomotet har beräkningar gjorts efter parametervärdena i tabell 5 och resultatet kan ses i tabell 6 och figur 15. Området har delats upp i två sektioner, en västlig och en östlig, med två olika avsänkingsvärden. För båda sektioner gäller att Todd och Mays metod genererar resultat med avsevärt mycket större avsänkingsområden än Krešićs metod. Influensavstånden beräknade med Todd och Mays metod sträcker sig utanför två grundvattenrör (PH1 och GW1506b) norr om området där ingen avsänkning har uppmätts. I den östra sektionen genererar även Krešićs metod ett influensavstånd som sträcker sig utanför grundvattenrör GW1506b utan uppmätt avsänkning.

Vad gäller jämförelsen mellan beräkningsresultaten och påverkansområdet för 0,3 meters avsänkning uppskattat av WSP, så överensstämmer det olika bra. Krešićs metod ger en relativt bra passning mot områdets nordöstra delar. Söder om området överskattar Krešić påverkansområdet i den östra sektionen och underskattar det i den västra. Samtidigt överskattar Todd och Mays metod WSP:s påverkansområde i samtliga fall, dock kan man hävda att en förlängning av den västliga sektionen hade gett en god passning mot sydväst.



Figur 15: Resultande influens- och påverkansområden (0,3 meter) från beräkningsresultaten för Sörmomotet, uppdelat i en västlig och en östlig sektion.

Tabell 5: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 15.

Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	230
Anläggningens radie (r_a) [m]	15
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	4 & 5,6
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

Tabell 6: Resultande influens- och påverkansområden för figur 15. V.s = västra sektionen, Ö.s = östra sektionen.

Analytisk metod	Influensområde (m)		Påverkansområde 0,3 m (m)	
	V.s.	Ö.s.	V.s.	Ö.s.
Krešić	297	394	140	207
Marinelli & Niccoli	297	394	141	205
Todd & Mays	468	656	290	444

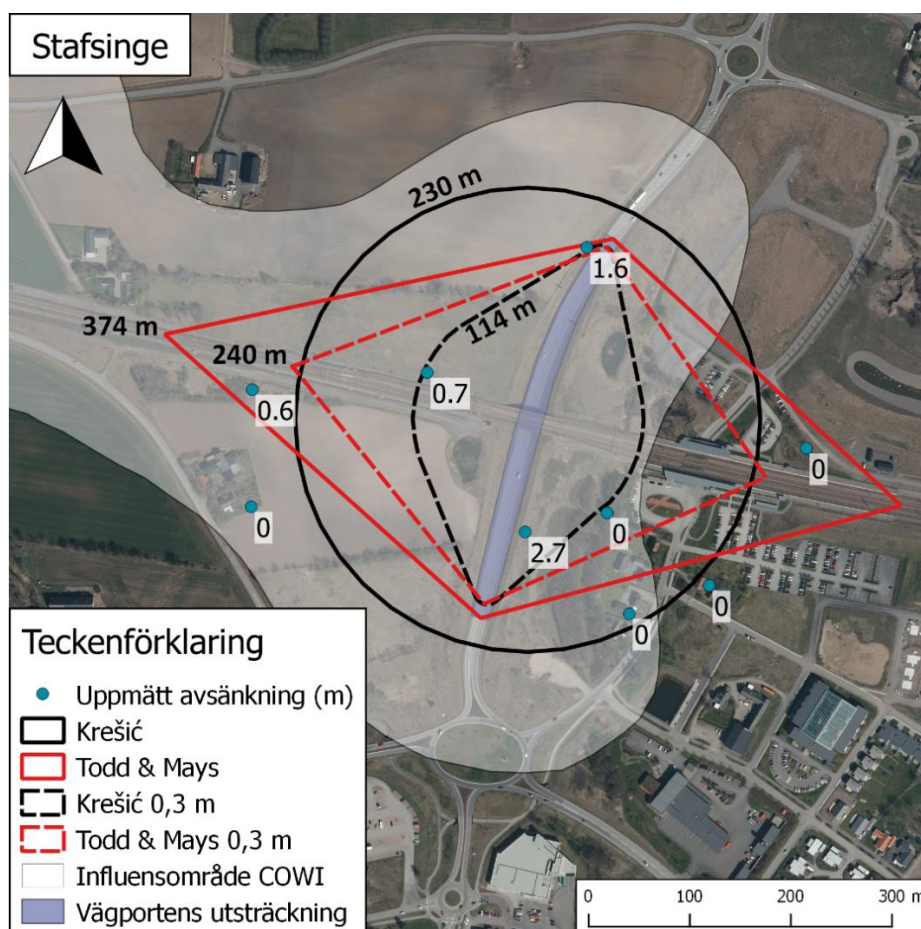
5.1.2 Stafsinge

För vägporten vid Stafsinge har också alla tre beräkningsmetoder använts för att generera influensavstånd och påverkansområden. De parametervärden som har använts i beräkningarna redovisas i tabell 7 och resultaten i tabell 8 och figur 16. Förhållandena vid Stafsinge är sådana att den största avsänkningen har skett i mitten av anläggningen och avtar sedan längs med ramperna norr och söder ut. Det medför att det största beräknade influens- och påverkansområdet genereras från anläggningens mittpunkt. Områdena minskar därefter i takt med avsänkningen, därav områdenas utformning som syns i figur 16. Då Krešićs metod beskriver radiellt flöde genererar den i kombination med tillvägagångsättet med flera brunnar områden med rundade former, medan Todd och Mays metod resulterar i diamantformade områden på grund av den tvådimensionella flödesbeskrivningen.

Influensområdet framtaget genom Krešićs metod får i det här fallet en cirkulär form då beräkningsresultatet för den största avsänkning genererar ett influensområde som sträcker sig utanför områdena generade för resterande avsänkningsvärden.

Generellt för resultaten från Stafsinge är att Todd och Mays metod även här ger resultat med betydligt högre värden än Krešićs metod. Jämfört med de uppmätta avsänkningsnivåerna redovisade i kartan motsäger flera av värdena de framställda avsänkningsområdena. Exempelvis sammanfaller en uppmätt avsänkning på 1,6 meter i grundvattenrör 0/440 v15 v154 L5108 vid anläggningens norra ände med den maximala utsträckningen av tre av de fyra avsänkningsområdena.

Jämfört med influensområdet framtaget av COWI underskattar både Krešić och Todd och Mays avsänkningens utsträckning mot syd, väst och norr. Åt öster däremot, överskattar istället de båda metoderna influensområdet jämfört med COWI:s. Värt att nämna är att COWI i sitt arbete även tagit hänsyn till schaktningsarbete längre västerut längs järnvägssträckan, därav områdets fortsatta utsträckning i det väderstrecket.



Figur 16: Resultande influens- och påverkansområden (0,3 meter) från beräkningsresultaten för Stafsinge. Avståndsvärdena som presenteras i kartan är områdenas maximala utsträckning.

Tabell 7: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 16.

Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	456
Anläggningens radie (r_a) [m]	10
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	4,5–0
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

Tabell 8: Resultande influens- och påverkansområden för figur 16.

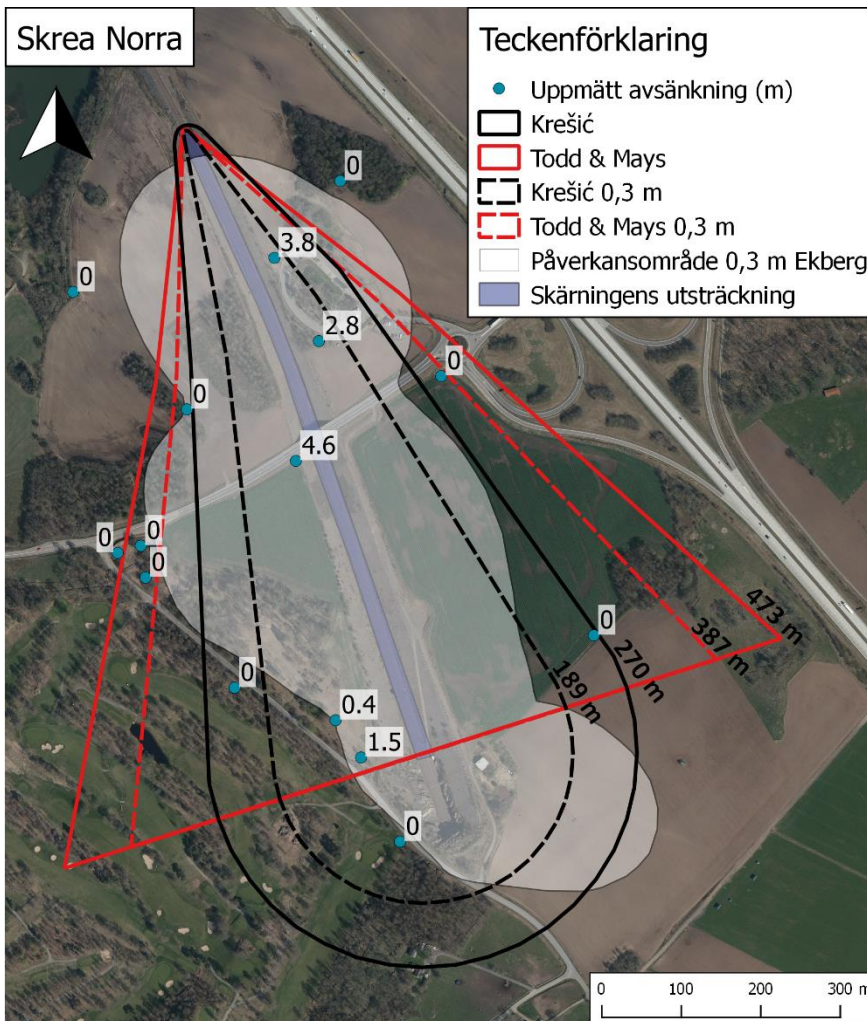
Analytisk metod	Max influensområde (m)	Max påverkansområde 0,3 m (m)
Krešić	230	114
Marinelli & Niccoli	230	113
Todd & Mays	374	240

5.1.3 Skrea norra

Beräkningarna för Skrea norra har utförts med parametervärdena redovisade i tabell 9 och resultaten presenteras i tabell 10 och figur 17. Då den största avsänkning har skett vid anläggningens södra ände är även beräknade influens- och påverkansområden störst där. Områdenas utsträckning minskar därefter mot anläggningens norra delar allt eftersom avsänkning minskar. Även här kan områdenas olika utseende förklaras med metodernas olika förhållningssätt till grundvattenflödet, radiellt respektive tvådimensionellt flöde.

Precis som för de två föregående lokalerna så genererar Todd och Mays metod betydligt större influens- och påverkansområden än Krešićs metod. Jämfört med de uppmätta avsänkningsvärdena infaller alla punkter där en avsänkning har uppmätts inom samtliga framtagna avsänkningsområden. Alla beräknade områden innefattar dock samtidigt minst en punkt där ingen avsänkning har uppmätts.

Vad gäller jämförelsen mellan beräkningsresultaten och påverkansområdet (0,3 meter) framtaget av Ekberg så är överensstämmelsen varierande. Båda metoderna överskattar påverkansområdets utsträckning vid de södra delarna av anläggningen och underskattar det vid de norra delarna. Däremellan förekommer sektioner där metodresultaten uppvisar bättre passning mot Ekbergs påverkansområde men passningen är inkonsekvent.



Figur 17: Resultande influens- och påverkansområden (0,3 meter) från beräkningsresultaten för Skrea norra.

Tabell 9: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 17.

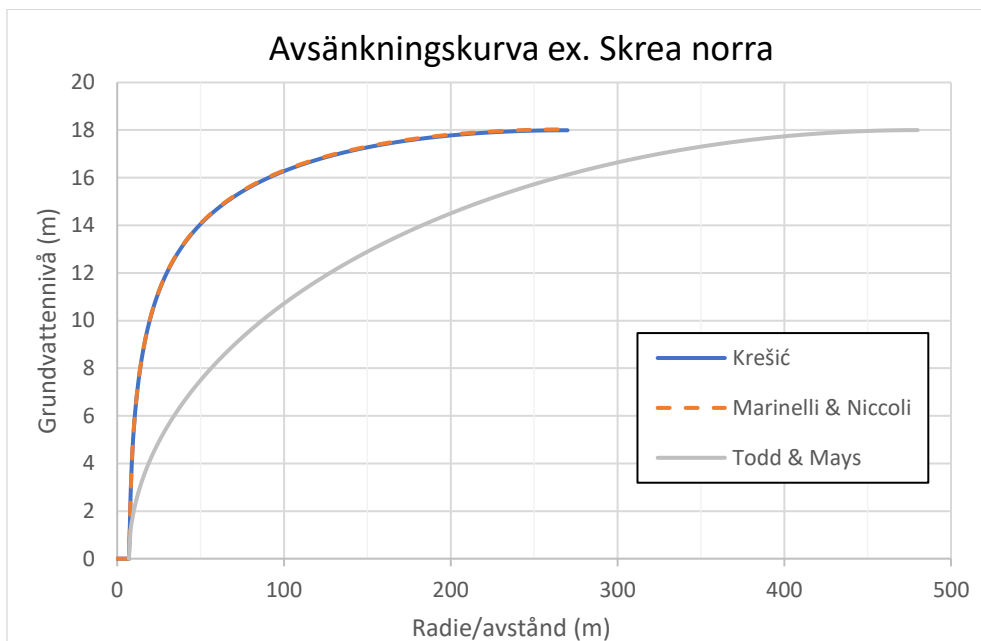
Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	456
Anläggningens radie (r_a) [m]	7,5
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	18–0
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

Tabell 10: Resulterande influens- och påverkansområden för figur 17.

Analytisk metod	Max influensområde (m)	Max påverkansområde 0,3 m (m)
Krešić	270	189
Marinelli & Niccoli	270	185
Todd & Mays	473	387

5.2 Metodjämförelse

För att tydligare presentera resultatet från de olika analytiska metoderna har avsänkningskurvor för respektive metod ritats ut i figur 18 och 19. Samma parametervärden (tab. 11 och 13) har använts tillsammans med alla tre analytiska metoder för att jämföra deras resultat. De parametervärden som använts är de samma som för den södra delen av Skrea norra (fig. 18) och för den västra sektionen vid Sörmomotet (fig. 19). I båda exemplen syns hur både Krešićs samt Marinelli och Niccolis metoder ger identiska resultat med avsänkningskurvor som följs åt från anläggningen till influensområdets gräns. Todd och Mays metod genererar i alla fall ett influens- och påverkansområde större än de två andra metoderna.



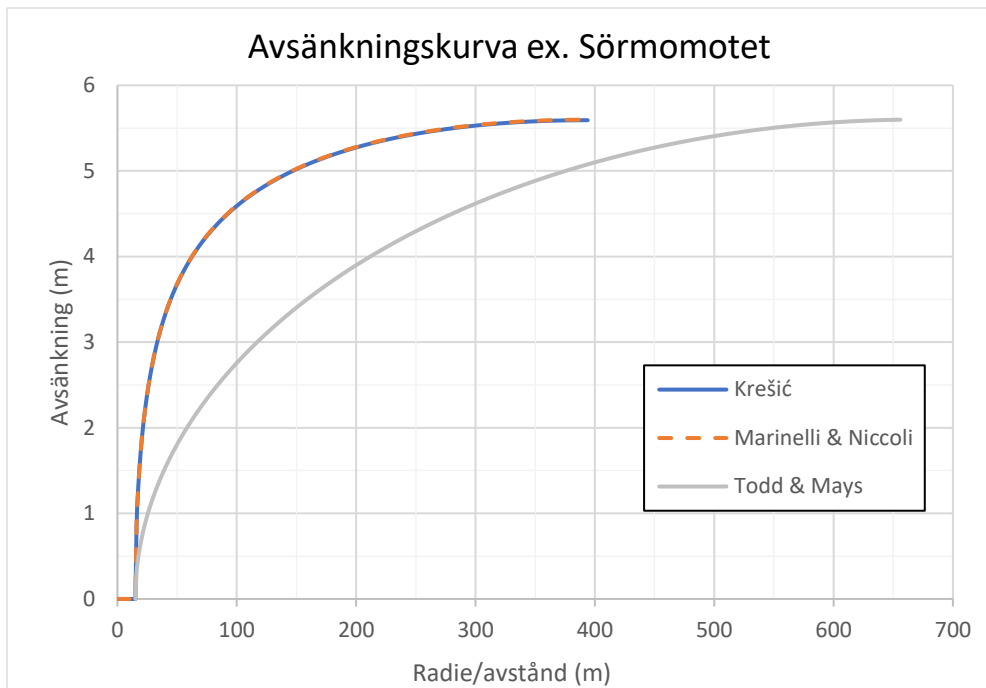
Figur 18: Avsänkningskurva från beräkningsexempel från Skrea norra där grundvattennivåer har plottats mot avstånd från anläggningens mittpunkt.

Tabell 11: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 18.

Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	456
Anläggningens radie (r_a) [m]	7,5
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	18
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

Tabell 12: Resulterande influensområde för figur 18.

Analytisk metod	Influensområde (m)
Krešić	270
Marinelli & Niccoli	270
Todd & Mays	473



Figur 19: Avsänkingskurva från beräkningsexempel från Sörmomotet där grundvattennivåer har plottats mot avstånd från anläggningens mittpunkt.

Tabell 13: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 19.

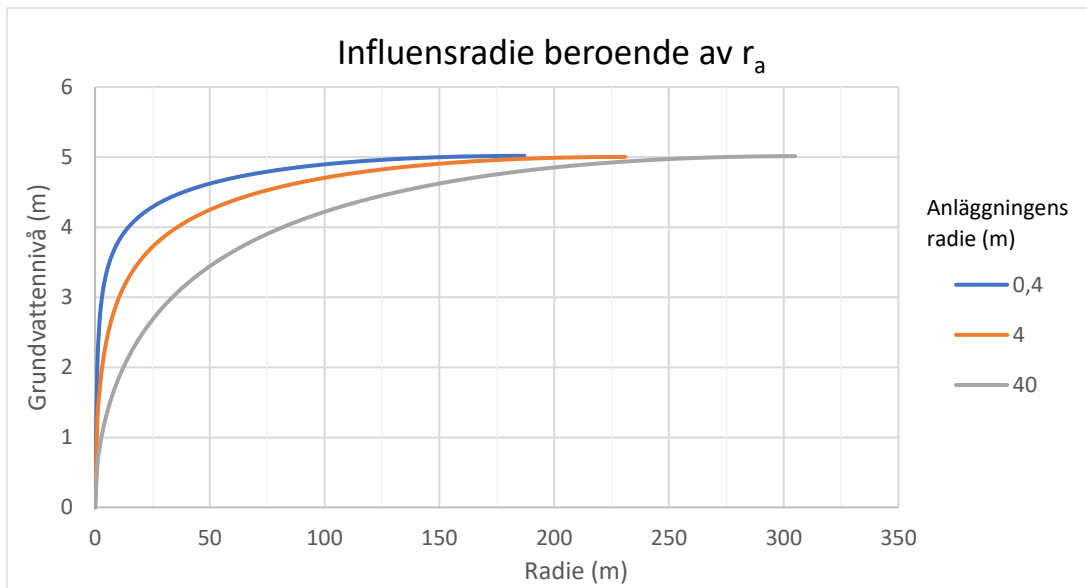
Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	230
Anläggningens radie (r_a) [m]	15
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	5,6
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

Tabell 14: Resulterande influensområde för figur 19.

Analytisk metod	Influensområde (m)
Krešić	394
Marinelli & Niccoli	394
Todd & Mays	656

5.2.1 Influensområde beroende av anläggningsradien

Nedan presenteras resultatet från beräkningar för att undersöka hur anläggningens radie påverkar influensradien (fig. 20). Krešićs samt Marinelli och Niccolis metoder är de två som använder sig utav parametern anläggningsradien och av dem valdes Krešićs analytiska metod ut för att användas i det här syftet. Parametervärdena som använts i testet (tab. 15) är antagna efter rimliga tänkbara värden men är inte hämtade från något verkligt exempel. Figur 20 visar avsänkingskurvor där tre olika storheter på anläggningens radie har använts: 0,4, 4 och 40 meter. Grafen visar på att större anläggningsradie resulterar i ett större influensområde. Notera att samtliga avsänkingskurvor här redovisas så att de utgår ifrån samma punkt i stället för från anläggningens ytterkant, detta för att bättre spegla skillnaderna i avsänkningstratten mellan de olika situationerna.



Figur 20: Avsänkingskurvor genererade med Krešičs metod med varierande ingångsvärden av anläggningens radie (r_a).

Tabell 15: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 20.

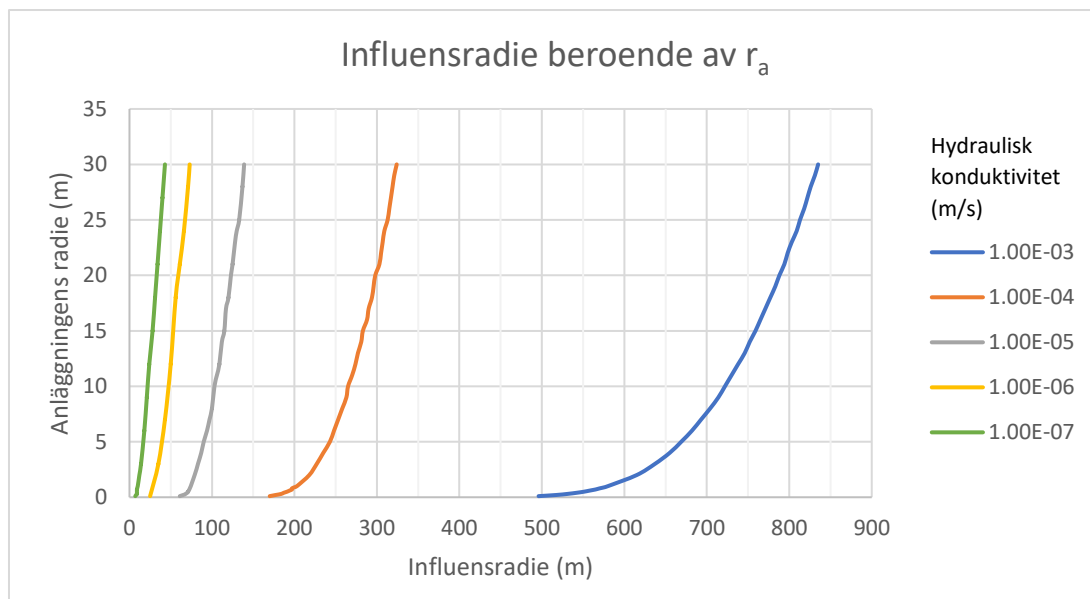
Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	400
Anläggningens radie (r_a) [m]	0,4, 4 & 40
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	5
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

Tabell 16: Resultande influensområde för figur 20.

Anläggningens radie (m)	Influensområde (m)
0,4	187
4	235
40	305

Vidare visar figur 21 hur olika storleksordningar av den hydrauliska konduktiviteten i samspel med anläggningsradien påverkar influensområdet. Även här har Krešičs analytiska metod använts. Testet utfördes på fem olika hydrauliska konduktiviteter från $1,0 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-7} m/s. Beräkningar har utförts med ökande värden på anläggningsradien (r_a) från noll till 30 meter.

Resultaten i figur 21 visar på att anläggningsradien har som störst inverkan på influensradien vid låga värden, för att sedan avta i effekt mot större r_a -värden. Det är också tydligt att den hydrauliska konduktiviteten förstärker det här sambandet då en högre hydraulisk konduktivitet ger en betydligt större ökning av influensområdet förhållande till ökningen i anläggningsradien. Det är även tydligt att en förändring i en storleksordning har en större effekt på anläggningsradien om förändringen sker hos den hydrauliska konduktiviteten, medan en storleksordning större eller mindre av anläggningsradien inte ger en lika stor effekt.



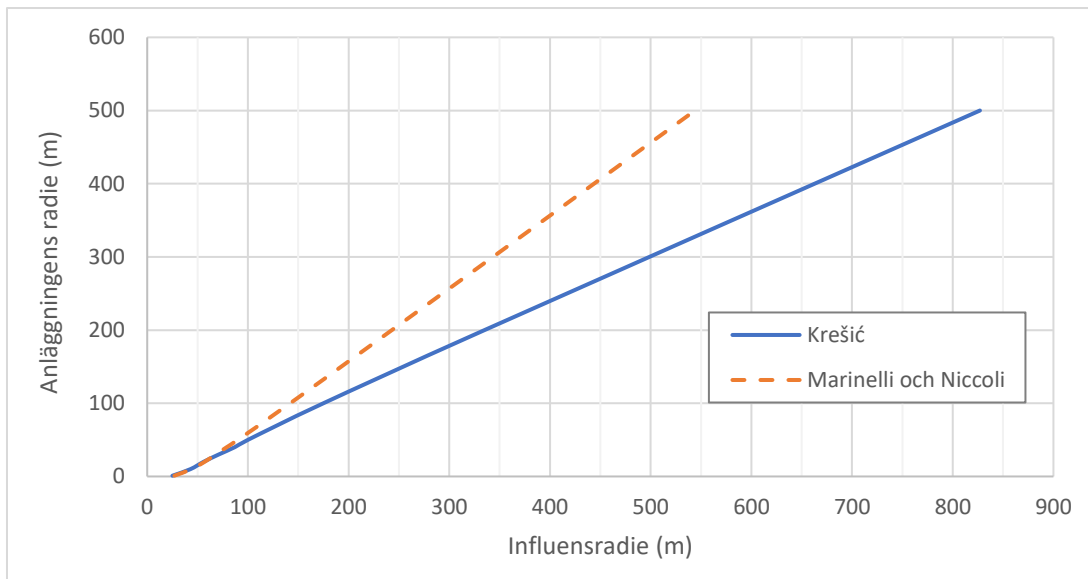
Figur 21: Anläggningsradie (r_a) plottat mot influensradie (R) för fem olika storleksordningar av hydraulisk konduktivitet.

Tabell 17: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 21 presenteras i tabellen nedanför.

Parameter	Värde
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	400
Anläggningens radie (r_a) [m]	0–30
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	5
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

5.2.2 Anläggningsradiens effekt på Krešićs och Marinelli & Niccolis metoder

Den enda situationen då det uppstår någon framträdande skillnad mellan Krešićs beräkningsmetod och Marinelli och Niccolis beräkningsmetod är vid situationer med exceptionellt höga värden på anläggningsradien. Vid ett sådant fall genererar de båda metoderna olika influensradier, vilket går att utläsa ur figur 22. Här presenteras en situation olik de andra testlokalerna med en större avsänkning, lägre hydraulisk konduktivitet och kraftigt ökande anläggningsradie. Ur figur 22 går det även att utläsa att differensen resultaten emellan ökar med ökad anläggningsradie. Detta i och med att influensradien genererad av Krešićs beräkningsmetod påverkas mer av ökade värden på anläggningens radie jämfört med Marinelli och Niccolis resultat.



Figur 22: Anläggningsradie (r_a) plottat mot influensradie (R) för Krešićs samt Marinelli och Niccolis beräkningsmetoder.

Tabell 18: Parametervärden använda för beräkningarna i figur 22 presenteras i tabellen nedanför.

Parameter	Värde
Hydraulisk konduktivitet (K) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-8}$
Grundvattenbildning (W) [mm/år]	400
Anläggningens radie (r_a) [m]	1–500
Ursprunglig grundvattennivå (H) [m]	50
Vattennivå anläggning (h_a) [m]	0

6 Diskussion

6.1 Jämförelse mellan beräkningsresultat och uppmätta grundvattennivåer

I följande stycken diskuteras och jämförs beräkningsresultaten från de tre analytiska metoderna med de av WSP, COWI och Ekberg framtagna influens- och påverkansområden samt uppmätta avsänkningsvärden. Det är av stor vikt att läsaren är underfund med att dessa publicerade influens- och påverkansområden inte ska betraktas som någon absolut sanning. De är alla uppskattningar baserade på uppmätta punktvärden, visserligen professionella sådana men dock fortfarande uppskattningar.

6.1.1 Sörmomotet

Det uppskattade påverkansområde som tagits fram av WSP (Trafikverket, 2018b) för Sörmomotet visar förmodligen en realistisk bild av avsänkningsområdet söder om anläggningen. De har tagit hänsyn till den bergöveryta som sträcker sig sydväst-nordöst i områdets södra delar. Berget fungerar förmodligen som en närmast tät hydraulisk gräns, en så kallad negativ hydrologisk gräns, och begränsar troligtvis tillgången på tillrinnande grundvatten. Mot norr är dock utsträckningen svårare att uppskatta då ingen liknande barriär existerar i det väderstrecket. Påverkansområdet genererat av Krešićs metod ger en relativt bra passning mot WSP:s, men dess riktighet är samtidigt svårare att bekräfta.

Beslutet att dela upp anläggningen i två sektioner erbjöd en mer anpassad bild av avsänkningsområdena men trots det blir resultatet fortfarande missvisande vid anläggningens kanter och vid gränsen mellan de två sektionerna. De två avsänkningsvärden som använts i beräkningarna representerar den maximala avsänknningen i anläggningen och har applicerats på hela schaktområdet. I själva verket minskar avsänknningen till noll mot anläggningens ändar, vilket innebär att de beräknade avsänkningsområdena där är överskattade. Förenklingen att endast använda två avsänkningsvärden för hela anläggningen påverkar därför slutresultatet. Resultaten hade kunnat förbättras om ett tillvägagångssätt likt det som applicerats på Stafsinge och Skrea norra hade använts även för Sörmomotet. Det hade emellertid ställt högre krav på informationen om anläggningens utformning och avsänkningsvärden.

I två grundvattenrör (382515GW och GW1506b) som använts i WSP:s utredning har mätningarna påbörjats efter byggstarten och för ett rör (GW1507) har mätningen avbrutits innan byggslut. Mätserierna har jämförts med mätserier från närliggande rör och med hjälp av dem förlängts med liknande grundvattenförändringar. Dessa korrigeringar skapar resultat som förstärker författarens uppfattningar men anses samtidigt vara rimliga då rören betraktas sitta i samma magasin. Dock är det fortfarande en osäkerhet som måste tas i beaktande. Utöver det är den temporala omfattningen av grundvattenmätningarna inte optimal. För att ha bättre kännedom om grundvattnets fluktuationer behövdes längre mätserier, med utsträckning både innan och efter projektering, ha funnits till hands.

6.1.2 Stafsinge

Influensområdena från den här studien skiljer sig från det framtaget av COWI (2013). COWI:s område är betydligt mer omfattande till storlek än de genererade med de tre analytiska metoderna. Detta är överensstämmer för hela lokalen utom till öster om den. Där indikerar de uppmätta grundvattennivåerna på att avsänknningen i det väderstrecket inte har lika stor omfattning. Det närmaste opåverkade grundvattenröret där befinner sig cirka 100 meter från anläggningen, betydligt närmare än det resulterande influensområdet från någon utav de tre beräkningsmetoderna. Här har COWI:s influensområde en passning som verkar sammanfalla med uppmätta nivåer. Norr, väst och söder om området är däremot möjligtvis influensområdet av COWI överskattat jämfört med uppmätta avsänkningsnivåer, speciellt söder och norr om området baserat på det stora avståndet från de största avsänkningarna vid centrum av anläggningen. Värt att notera är att det påverkansområde som COWI tagit fram är baserat på grundvattennivåer uppmätta under april och maj månad, en period under året

då grundvattennivåerna generellt är över det normala, vilket innebär att avsänkingsområdet under den perioden har sin minsta utbredning. En jämförelse mellan beräkningsresultaten från den här studien och COWI:s påverkansområde är därför inte helt problemfri.

Det är oklart vida grundvattenrör 106950 h35, som uppvisar en avsänkning på 0,6 meter, är direkt påverkat av avsänkningen från anläggningen eller om avsänkningen istället beror på annat arbete längs med järnvägssträckan. Med tanke på dess närhet till banvallen, det stora avståndet till anläggningen och närliggande grundvattenrörs nivåer kan det anses troligt att den avsänkningen inte beror på vägporten.

Att grundvattenrör 0/440 v15 v154 L5108, vilket är lokaliserat precis vid anläggningens norra ände, uppvisar en avsänkning på 1,6 meter trots det antagna avsänkingsvärdet i närheten är nära noll tyder på att avsänkningen fortplantat sig längre i den riktningen än vad beräkningsresultatet visar. En möjlig förklaring är att anläggningens omfattning har underskattats och den avsänkning som har skett är mer omfattande än den som antagits vid beräkningarna, alternativt att den hydrauliska konduktiviteten i den riktningen är högre.

6.1.3 Skrea norra

En liknande situation som vid Sörmomotet återfinns vid Skrea norra där en bergsrygg går tvärs anläggningens södra ände och agerar som en negativ hydraulisk gräns, vilket inte har tagits hänsyn till i beräkningarna. Influensområdet sträcker sig då inte lika långt söderut som resultaten från Krešićs metod visar. Detta skulle i sin tur istället resultera i en större utsträckning av influensområdet åt öst och väst för att kompensera för den negativa hydrauliska gränsen. Det ska emellertid noteras att denna hydrauliska gräns inte behöver innebära ett nollflöde utan ett visst flöde förekommer säkerligen, speciellt med tanke på att det lokala berget påstås vara av dålig kvalitet samt förekomst av vattenförande sprickzoner.

Påverkansområdet från Ekberg (2010) har sin smalaste utbredning vid områdes södra ände, vilket sammanfaller med den största avsänkningen, kontradiktoriskt det vanliga antagandet att det största avsänkingsområdet härrör från den största avsänkningen vid homogena geologiska förhållanden. Samtidigt tyder den stora differensen de närliggande grundvattenrören 112706 h92 och 112760 h77 emellan, med avsänkingsvärden på 0,4 respektive 1,5 meter, på att det förekommer påtaglig heterogenitet i området.

Det är möjligt att det värde på den hydrauliska konduktiviteten som användes vid beräkningarna var för högt. Den för lokalen dominerande jordarten är en grusig sandig morän och en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-5}$ m/s kan ha varit olämplig att använda. Andra källor (Carlsson & Gustafson, 1991; Svensson, 2012) anser att ett representativt konduktivetsvärde för en sådan morän bör ligga mellan $1 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Användandet av ett konduktivetsvärde en storleksordning lägre hade minskat de resulterande influens- och påverkansområdena.

6.2 Metodjämförelse

Genom alla tester har beräkningsmetoden av Todd och Mays (2005) genererat de största influens- och påverkansområdena. Dessa områden framstår som överskattningar jämfört med uppmätta grundvattennivåer och avsänkningar. Krešićs samt Marinelli och Niccolis beräkningsmetoder genererar däremot resultat som bättre överensstämmer med uppmätta avsänkningar och de influens- och påverkansområden som publicerats för de olika lokalerna. Dock är det svårt att uppskatta resultatens träffsäkerhet då det är väldigt svårt att bestämma de verkliga avsänkingsområdena. Därför måste det tas i beaktning att stora felmarginaler kan förekomma. Att göra en rättvis bedömning av metodernas träffsäkerhet är egentligen bara möjligt under särskilt kontrollerade förhållanden där influens- och

påverkansområdet kan bestämmas med någorlunda säkerhet. Trots det är ändå dessa resultat värdefulla då de ger en uppfattning om metodernas funktionalitet.

Beräkningsresultaten från Krešićs samt Marinelli och Niccolis analytiska metoder, i försöken att tillämpa dem på de tre testlokalerna, är slående lika. Näst intill identiska avsänkningskurvor ha genererats från de båda metoderna, vilket tydligt framgår i figur 18 och 19. Resultaten är egentligen föga förvånande då båda metoderna grundar sig i samma principer och antaganden, använder samma uppsättning av parametrar och är vidareutvecklingar av Thiems brunnekvation. Den minimala skillnad som ibland ses i resultaten metoderna emellan kan möjligen bero på avrundningsfel i beräkningsprocessen. Tillvägagångssättet för Krešićs metod bygger på iteration för att bestämma influensradien. Ett urval av flödesvärden testas i ekvation 10 för att sedan se vilket värde som resulterar i den bästa matchningen med andra sidan av uttrycket. Det värdet används sedan för att beräkna influensradien genom ekvation 9. Flödesvärdenas differens sinsemellan avgör då precisionen på influensradien, med andra ord, ju mindre skillnad mellan de ingående flödesvärdena som testas desto högre precision får den utgående influensradien. Dock ska det inte förbises att hög precision inte är det samma som hög riktighet.

Utifrån tillämpningen av metoderna förefaller de två alltså utbytbara med varandra. Studerar man dock de fall där fiktiva parametervärden använts för att skildra situationer olika de tre testlokalerna ser man däremot att så inte alltid är fallet. Vid väldigt höga ansatta värden på anläggningens radie skiljer sig den resulterande influensradien avsevärt metoderna sinsemellan, vilket tydligt visas i figur 22. Även i fall då samtliga parametrar antar normala värden medan anläggningsradien tillåts öka syns samma differens i resultaten, vilket påvisar att det är just anläggningsradien som är ansvarig för den här skillnaden i influensradie metoderna sinsemellan. Dock är en situation där till exempel avsänkningens antar ett litet värde samtidigt som anläggningens radie antar väldigt stora värden inte realistisk. I fallet för exemplet i figur 22 uttrycker sig differensen först vid en anläggningsradie på cirka 50 meter, för att sedan öka allt eftersom anläggningens radie ökar. Detta förklarar varför ingen skillnad kunde urskiljas ur resultaten från tillämpningen av metoderna på testlokalerna. Vid anläggningsradier på endast ett få tiotal meter har inte den parametern tillräckligt stor påverkan för att ge upphov till skillnader mellan de två metodernas resultat.

De enda situationer då så pass stora r_a -värden är realistiska är egentligen bara när det handlar om dagbrott eller täkter. Stora dagbrott som används inom gruvindustrin kan uppnå storlekar på hundratals meter i diameter. I de fallen är det viktigt att känna till den här principiella skillnaden mellan Krešićs och Marinelli och Niccolis beräkningsmetoder så att det kan tas i beaktande vid metodval. I exemplet i figur 22 ger en anläggningsradie på 400 meter en influensradie på cirka 450 meter genom Marinelli och Niccolis metod och en radie på cirka 650 meter med Krešićs metod, en tämligen markant skillnad.

I artikeln av Marinelli och Niccoli (2000), där metoden som använts i den här studien är publicerad, beskrivs metoden som en lösning för att prognostisera inflöden till just dagbrott. Där beskrivs formeln för att beräkna influensområdet som ett steg i förloppet att beräkna inflödet. De påstår att metoden, använd i rätt situationer, ger en god överensstämmelse mot uppmätta flödesvärden, vattenbalanser och numeriska modelleringar. Detta syftar då bara på inflödet och de utelämnar kommentarer angående beräkningar av influensradien och dess tillförlitlighet. Trots metodens anpassning till dagbrott är det inte klart om den är att föredra framför Krešićs metod vid sådana situationer. I en studie av Blomberg (2015) tillämpades både Krešićs samt Marinelli och Niccolis beräkningsmetoder på fem svenska aktiva dagbrott. Studiens främsta syfte var att jämföra beräknat inflöde med uppmätt inflöde men även influensradien undersöktes. Blomberg skriver att samtliga influensradier som resulterade från metoderna troligtvis är överskattningar då metoderna inte tar hänsyn till faktorer så

som topografi och spricksystem. Han skriver samtidigt att det resulterande inflödet i flera fall är tillräckligt nära uppmätta värden för att metoderna kan anses vara gångbara i de situationerna. Om detta går att överföra på det steg i processen som beräknar influensradien är dock oklart, och i vilken grad de är representativa för att beräkna influensradien för dagbrott framgår inte, varken från Blombergs eller den här studien.

Vidare går det dock att diskutera för och nackdelar hos metoderna som inte uttrycker sig i beräkningsresultatet. Marinelli och Niccolis metod kan vara att föredra framför Krešićs i och med att beräkningsprocessen är någorlunda enklare då den innehåller ett steg mindre. Att först iterera fram ett Q -värde för att sedan använda det värdet i ytterligare en formel för att generera en influensradie, vilket är fallet i Krešićs metod, är mer komplicerat än Marinelli och Niccolis metod där influensradien itereras fram direkt. Att använda en formel i stället för två är kort sagt en effektivisering. Dock måste det tilläggas att om både influensradien och inflödet är av intresse, vilket inte sällan är fallet för en hydrogeologisk undersökning, är beräkningsprocessen totalt sett lika lång för båda metoderna. Fortsatt kan existensen av e (basen för den naturliga logaritmen) i Krešićs ekvation 10 bara i sig ge upphov till osäkerheter. I till exempel studien från Blomberg (2015) beskrivs Krešićs beräkningsmetod utan inkluderingen av e , vilket skiljer sig från originalkällan av Krešić själv. Ett utelämnande av denna matematiska konstant leder till stora skillnader i beräkningsresultaten. Att istället använda Marinelli och Niccolis analytiska metod hade effektivt utslutit den här problematiken.

Den största fördelen med Marinelli och Niccolis metod är emellertid att den tillåter användaren att inte bara inkludera inflöde från anläggningens sidor, utan även ta hänsyn till inflöde från anläggningens botten, något som inte är möjligt med Krešićs metod. Även om det inte har någon betydelse när det gäller beräkningar av influensradien så bör det ändå tas i beaktning när det kommer till utvärdering av metoden som helhet då frågeställningar som rör influensområde och inflöde ofta är sammanflätade i hydrogeologiska sammanhang. Då kan det vara fördelaktigt att använda en mer flexibel metod.

Följande ska det tilläggas att oavsett vilken analytisk beräkningsmetod som väljs är den ensam inte tillräcklig att förlita sig på. Då dessa analytiska metoder kräver antaganden om bland annat homogenitet och isotropi, situationer som aldrig fullt påträffas i verkligheten, visar de endast en begränsad bild. Därför är det viktigt att resultaten utförs och tolkas i samband med en grundlig hydrogeologisk utredning där faktorer som inte beräkningsmetoderna kan ta hänsyn till, så som områdets geologi och närvaro av hydrauliska gränser, även kan vägas in i resultaten. En handledning med rekommendationer om arbetsflöden och viktiga frågeställningar en sådan utredning bör omfatta publicerades nyligen av SGU (2019c). En sådan hydrogeologisk utredning ger en bra grund för en bättre tolkning och hantering av resultaten från en analytisk beräkningsmetod.

6.3 Hantering av parametrar

6.3.1 Anläggningens radie

Hur parametern r_a bestäms ur Krešićs (1997) perspektiv är väldigt intuitivt, det råder ringa tvivel om hur radien av en brunn bestäms. Samma princip går även att applicera på större cirkulära anläggningar, även om sluttande kanter kan innebära viss problematik. När det dock kommer till anläggningar som inte är av cirkulär form är det inte längre lika självklart. Franklin (2005) hävdar till och med att parametern anläggningsradien, eller brunnsradien som den benämns i studien, inte går att applicera på en vägport. Detta då de horisontella dräneringsrör som sänker grundvattennivån inte är jämförbara med en brunn. Hon föreslår istället att ett värde på mindre än 0,5 meter bör antas för parametern anläggningsradien. Vilken definition som används har betydelse då en skillnad på en storleksordning hos anläggningsradien ger utslag i influensradien, vilket ses i figur 20. Marinelli och Niccoli (2000) berör emellertid just sådana icke-cirkulära situationer då deras artikel beskriver grundvattenpåverkan från

dagbrott, anläggningar som sällan antar lika symmetriska former. Genom att använda sig av anläggningens ekvivalenta radie, alltså där sidorna för en rektangulär anläggning används för att generera en motsvarande cirkulär radie, är det möjligt att skapa en cirkel med motsvarande yta. Detta kan vara ett gångbart tillvägagångsätt om rektangelns sidor förhåller sig till varandra i närheten av 1:1. Det blir dock svårare att försvara om anläggningen är smal och avlång, vilket är fallet för samtliga inkluderande anläggningar i den här studien. Då en metod baserad på en radiell modell används för att beräkna influensområdet från ett långsmalt schakt, där en ekvivalent radie används som anläggningsradien, kommer resultera i ett avsänkingsområde som överskattas vis anläggningens centrum och underskattas vid dess ändrar. Att utgå ifrån en enda central avsänkingspunkt vid i en sådan situation är då gravt missvisande. När man även beaktar realiteten att samma avsänkning inte alltid sker i hela anläggningen, vare sig det beror på schaktets utformning eller grundvattnets gradient, komplicerar det ytterligare det hela.

För att hantera de här problemen applicerades ett annat tillvägagångsätt på de tre lokalerna i den här studien. I stället för att utföra en enda beräkning i anläggningens centrum utfördes flertalet beräkningar längs med hela anläggningens sträckning. Detta i ett försök att simulera påverkan av avsänkning från hela anläggningen. Det tillät även möjligheten att i olika delar av anläggningen ta hänsyn till varierande avsänkingsnivåer, vilket utnyttjades för både Stafsinge och Skrea norra. Med den här lösningen återstår dock fortfarande frågan hur parametern anläggningsradien ska bestämmas. En ekvivalent radie är inte längre aktuell i och med att den inte är lämpad för långsmala anläggningar. I stället valdes halva anläggningens bredd att representera r_a -värdet, vilket framstår som det mest logiska alternativet i förhållande till metodernas analytiska modeller.

Att använda metoder som beskriver ett radiellt flöde, vilket både Krešić samt Marinelli och Niccoli gör, på det här sättet med flertalet beräkningspunkter längs en linje går dock att ifrågasätta. Då varje beräkning för en specifik avsänkning sker helt individuellt tas inte hänsyn till någon interferens beräkningarna emellan. Avsänkningar påverkar varandra enligt superpositionsprincipen, alltså att avsänkning från två överlappande avsänkningstrattar kan adderas för en total avsänkning i en punkt (Krešić, 1997), och teoretiskt sett innebär det att influensradien framtagen med individuella radiella beräkningar underskattar den verkliga influensradien.

Dessa resonemang leder till att en metod som beskriver ett radiellt flöde i själva verket inte är särskilt lämplig för att beskriva grundvattensituationen för ett långsmalt schakt. En analytisk metod som beskriver grundvattenflödet i två dimensioner är bättre lämpad i en sådan situation, vilket Todd och Mays (2005) metod gör. Med en sådan metod kan ett oändligt antal beräkningar göras längs med en sträcka utan att de påverkar varandra, samtidigt som man slipper behöva ta hänsyn till anläggningens radie. Som nämnts tidigare uppvisar dock resultaten från Todd och Mays metod en sämre passning mot uppmätta avsänkingsvärden och förefaller överskatta influensavståndet. Anledningen till detta har inte kunnat fastställas och en mer ingående granskning av ekvationernas matematiska uppbyggnad hade varit nödvändigt för att förstå deras beteende bättre.

6.3.2 Hydraulisk konduktivitet

Flera tidigare studier (Blomberg, 2015; Franklin, 2005; Håkansson, 2017; Ragvald, 2012) där liknande frågeställningar och analytiska metoder har ingått har alla visat på att just den hydrauliska konduktiviteten är den parameter som metoderna är mest känsliga för. Det överensstämmer även med de resultaten som redovisas i den här studien. Figur 21 visar hur känslig Krešićs metod är för höga konduktiviteter. Det samma är även sant för de andra analytiska metoderna. Studeras figur 21 syns även att ju lägre den hydrauliska konduktiviteten är desto mindre effekt får ett hopp i en storleksordning. Detta innebär att vid en lokal med ett högkonduktivt material är det viktigare att den hydrauliska konduktiviteten bestäms med större säkerhet då mindre förändringar resulterar i stora

skillnader hos avsänkingsområdet. I områden med lägre konduktivitet blir då samtidigt skillnaderna inte lika omfattande och därför behöver inte samma höga krav ställas på konduktivitetsparametern. Vidare betyder även detta att områden med låg hydraulisk konduktivitet potentiellt är mer toleranta mot metodval då metoderna ger mindre utslag i de fallen, något som diskuteras av Håkansson (2017).

Enligt Blomberg (2015) är Marinelli och Niccolis analytiska metod mer känslig mot parametern hydraulisk konduktivitet än vad Krešićs metod är. I hans studie gav Marinelli och Niccolis metod högst inläckage vid höga konduktivitetsvärden och lägst inläckage vid låga konduktivitetsvärden. Huruvida samma slutsats kan dras gällande influensradien framgår dock inte.

Med tanke på metodernas känslighet mot den hydrauliska konduktiviteten är det av stor vikt att den bestäms med stor säkerhet, speciellt då det rör sig om högre konduktiviteter. Siktanalys eller än bättre provpumpning eller slugtest ger ett bättre underlag för att kunna bestämma den hydrauliska konduktiviteten med större säkerhet. Trots det kommer dock alltid en viss heterogenitet att existera i området. Det är därför även en god idé att använda ett intervall av den hydrauliska konduktiviteten istället för att använda ett exakt värde, för att på så vis ta hänsyn till heterogenitet. Även statistiska metoder, till exempel Monte Carlo-metoden, som tar fram de statistiskt mest troliga värdena, är ett bra sätt att hantera sådana osäkerheter på (Thomopoulos, 2013).

7 Slutsatser

I ett tidigt skede av projekteringen av ett schakt är det av intresse att använd en analytisk beräkningsmetod för att snabbt och till låga kostnader få en grov uppfattning om hur grundvattnet kan komma att påverkas. Sådana situationer har simulerats i den här studien och tre analytiska beräkningsmetoder har tillämpats på tre olika studieområden för att jämföra metodernas tillämpbarhet, resultatens passning mot uppmätta grundvattennivåer och dess känslighet mot ingående parametrar. De tillämpade analytiska metoderna är utvecklade av Krešić, Marinelli och Niccoli samt Todd och Mays.

Teoretiskt sett är en beräkningsmetod som beskriver ett tvådimensionellt flöde, så som Todd och Mays metod, att föredra när det gäller långa skärningar eller schakter, då den modellen bättre beskriver flödessituationen i det sammanhanget. En radiell modell, så som Krešićs eller Marinelli och Niccolis, är bättre lämpad för anläggningar där skillnaden mellan lång- och kortsida inte är så stor. Trots det visar testerna på att Todd och Mays beräkningsmetod upprepande gånger överskattar influens- och påverkansområden jämfört med uppmätta avsänkningar. Krešićs samt Marinelli och Niccolis metod genererar däremot resultat med en bättre överensstämmelse gentemot uppskattade avsänkingsområden. På grund av heterogenitet i studieområdena och ett begränsat antal grundvattenobservationer är dock jämförelserna förknippade med stora osäkerheter. För att erhålla underlag för bättre jämförelse krävs långa mätserier i ett stort antal välplacerade grundvattenrör. Med ett sådant underlag bedöms en bättre bedömning av metodernas uppskattning av omgivningspåverkan vara möjlig. Däremot bedöms metoderna fortfarande vara användbara för att i ett tidigt skede få en uppfattning om storleksordningen på ett framtida avsänkingsområde.

Vidare går det att dra slutsatsen att Krešićs samt Marinelli och Niccolis båda beräkningsmetoder ger så när som identiska resultat vid fall då en anläggningsradie inte större än några tiotal meter används. I de fallen är metoderna helt utbytbara med varandra. Däremot, vid anläggningar som uppnår betydligt större dimensioner, så som dagbrott, där anläggningsradien antar värden av hundratals meter, genererar Krešićs samt Marinelli och Niccolis metoder olika resultat. Denna principiella skillnad metoderna emellan är viktig att ha i åtanke vid sådana fall.

Alla tre metoder uppvisar en stor känslighet mot parametern hydraulisk konduktivitet, vilket har framförts i flera tidigare studier. Oavsett vilken metod som används är det därför av stor vikt att den hydrauliska konduktiviteten bestäms med så stor säkerhet som möjligt. Även anläggningsradien är viktig att ta hänsyn till, inte på grund av metodernas känslighet till den parametern, utan därför att det potentiellt finns flera olika tillvägagångssätt för att bestämma den. Beroende på situationen och anläggningens utformning kan olika definitioner användas.

Sist ska det poängteras att oavsett vilken analytisk beräkningsmetod som väljs måste en hydrogeologisk tolkning av området göras för att ta hänsyn till faktorer som inte går att inkludera i en matematisk formel. Till exempel behöver områdets geologi och hydrauliska gränser vägas in i bedömningen. Tillsammans med en sådan tolkning kan en analytisk beräkningsmetod vara ett värdefullt och effektivt verktyg för att uppskatta framtida påverkan från en grundvattenavsänkning.

8 Framtida studier

För eventuella framtida studier föreslås att de analytiska metoderna tillämpas på noga utvalda platser där möjligheten finns att bättre studera förändringen i grundvattennivåer. Idealiskt hade grundvattenrör placerats ut med jämt mellanrum på en rak linje från avsänkningens centrum för att skapa en bra möjlighet att kunna bestämma avsänkningens utbredning. Är avstånden mellan rören tillräckligt tätt borde det vara möjligt att kunna bestämma influensradien med relativt god träffsäkerhet. Detta hade underlättat vid jämförelsen mot beräkningsresultat och olika metoder sinsemellan och möjliggjort en bättre utvärdering av metodernas träffsäkerhet. Inkluderad i en sådan studie borde även en mer grundlig undersökning av anläggningsradiens effekt på beräkningsresultatet och vilken definition som är mest lämplig för olika situationer. En rekommendation kan även vara att en grundvattenmodellering utförs vid samma tillfälle för att möjliggöra en jämförelse mellan numeriska och analytiska beräkningsmetoder, då med samma förutsättning att endast en begränsad mängd data finns att tillgå. Att även inkludera fler analytiska metoder i jämförelsen hade varit av intresse.

9 Tack

Jag vill rikta ett stort tack till mina två handledare på Norconsult: Elodie Bénac, som initierade det här projektet och hjälpte mig starta upp arbetet; och Magnus Zetterlund, som gett mig värdefulla råd och vägledning genom arbetets gång. Jag vill även tacka Sara Kvartsberg och Viktor Broman för att ni suttit med på avstämningsmötena och bidragit med givande diskussioner, samt korrekturläst mina texter. Tack även till alla er övriga på Norconsult som fått mig att känna mig välkommen och inkluderad. Slutligen vill jag även tacka min handledare på Göteborgs universitet Roland Barthel, min examinator Mark Johnson samt min opponent Niclas Hultin.

10 Referenser

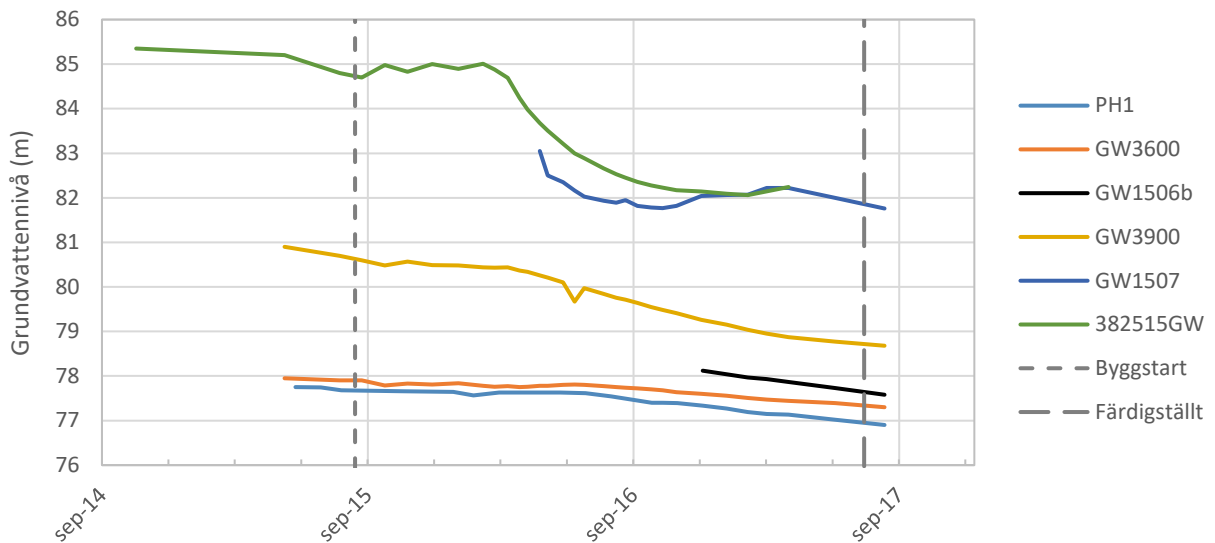
- Aqualog. (2010). PM - Kontrollprogram för grundvatten. Göteborg.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. Israel: McGraw-Hill Inc.
- Bear, J., & Zaslavsky, D. (1968). *Physical principles of water percolation and seepage*. Paris: Unesco.
- Blomberg, F. (2015). *Inläckage i dagbrott - En jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden i dagbrott i norra Sverige*. Stockholms Universitet, Stockholm.
- Carlsson, L., & Gustafson, G. (1991). Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Göteborg: Byggeforskningsrådet.
- COWI. (2013). Slutrapport Stafsinge - Grundvattenpåverkan under Bygg- och Driftskede. Göteborg.
- COWI. (2016a). Årsrapport 2015, Skrea Backe. Göteborg.
- COWI. (2016b). Årsrapport 2015, Stafsinge. Göteborg.
- COWI. (2016c). Årsrapport 2015, Tröingebergstunneln. Göteborg.
- Ekberg, J. (2010). *Skrea Backe - Erfarenhetsåterföring och uppföljning av infrastrukturprojekt*. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. (2010:104)
- Fetter, C. W. (2014). *Applied Hydrogeology* (4 uppl.). Essex: Pearson Education Limited.
- Franklin, I. (2005). *Jämförelse av beräkning och verklig grundvattensänkning vid vägportar*. Uppsala Universitet, Uppsala.
- Gustafson, G. (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Stockholm: Stockholm : Formas.
- Huisman, L. (1972). *Groundwater Recovery*. London - Basingstoke: The Macmillan Press LTD.
- Håkansson, P. (2017). *Grundvattensänkning vid schakter och byggnadsverk - En jämförelse av olika beräkningsmetoder*. Lunds Universitet, Lund.
- Karlstad Kommun. (2016). *Sörmoverket*. Hämtad 2019-03-14, från <https://karlstad.se/Bygga-och-bo/Vatten-och-avlopp/Dricksvatten/Vattenverk/Sormoverket/>
- Krešić, N. (1997). *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*. Boca Raton: CRC Lewis.
- Kruseman, G. P., & De Ridder, N. A. (2000). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Amsterdam: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).
- Lantmäteriet. (2019a). *GSD-Ortofoto*. Hämtad 2019-03-25, från <https://zeus.slu.se/get/?drop=>
- Lantmäteriet (2019b). *GSD-Terrängkartan*. Hämtad 2019-03-25, från <https://zeus.slu.se/get/?drop=get>
- Marinelli, F., & Niccoli, W. L. (2000). Simple Analytical Equations for Estimating Ground Water Inflow to a Mine Pit. *Ground Water*, 38(2), 311-314. doi: 10.1111/j.1745-6584.2000.tb00342.x
- Ragvald, J. (2012). *Ett gruvschakts påverkan på grundvattnets nivå och strömning i det omgivande berget*. Uppsala Universitet, Uppsala.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., & Pers, C. (2006). *Grundvattenbildning i svenska typjordar*. Uppsala: Uppsala Universitet, Institutionen för Geovetenskaper, Luft- och Vattenlära.
- SGU. (2019a). *Grundvattenpåverkan kring schakter, dagbrott och täkter Handledning vid bedömning av influensområde*. Sveriges Geologiska Undersökning. Uppsala.
- SGU. (2019b). *Kartvisaren Jordarter 1:25000 - 1:100000*. Hämtad, 2019-03-14, från <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-25-100.html>

- SGU. (2019c). *Metod för kartläggning och påverkansbedömning av grundvatten*. Hämtad 2019-05-27, från <https://www.sgu.se/handledning/kartlaggning-och-paverkansbedommning-grundvatten/>
- SGU. (u.å.-a). *Checklista för bergtakter*. Hämtad 2019-02-13, från <https://www.sgu.se/samhallsplanering/bergmaterial-for-byggande/stod-vid-ansokan-om-grus-och-bergtakter/checklista-for-bergtakter/>
- SGU. (u.å.-b). *Checklista för grustakter*. Hämtad 2019-02-13, från <https://www.sgu.se/samhallsplanering/bergmaterial-for-byggande/stod-vid-ansokan-om-grus-och-bergtakter/checklista-for-grustakter/>
- Svensson, J. (2012). *Hydraulisk konduktivitet i en morän - Inverkan av frys- och tiningscyklar vid olika överlast och packningsgrader*. Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- Thomopoulos, N. T. (2013). *Essentials of Monte Carlo Simulation*. New York, NY: Springer.
- Todd, D. K. (1959). *Ground water hydrology*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3:e uppl.): John Wiley and Sons, Inc.
- Trafikverket. (2018a). *Bygg om eller bygg nytt. Kapitel 2 Vägtyper, korsningar och förbättringsåtgärder*. Borlänge.
- Trafikverket. (2018b). *Kontrollprogram för grundvattennivåer. E18 Björkås - Skutberget*. Karlstad.
- Werner, K., Onkenhout, J., & Löv, Å. (2012). Effekter på grund- och vattenförhållanden vid grundvattenbortledning från berganläggningar, Steg 1 – Förstudie. *BeFo Rapport 117*.
- WSP. (2015). *PM Hydrogeologi E18, Björkås – Skutberget*. Helsingborg.
- Vägverket. (2008). *Arbetsplan E18 delen Björkås - Skutberget*. Karlstad.

11 Appendix

11.1 Sörmomotet

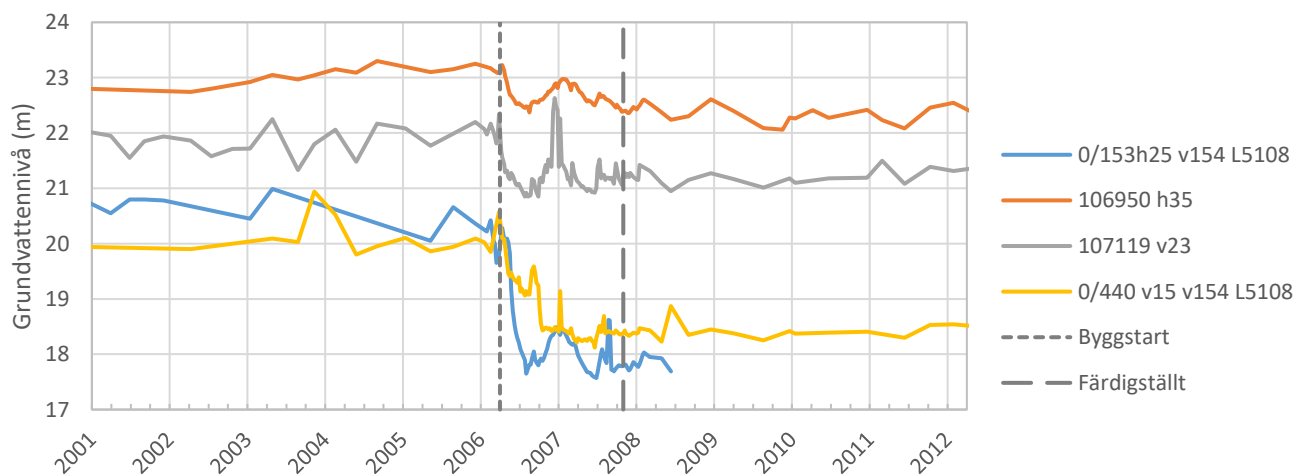
Grundvattenmätserier från lokal Sörmomotet.



Figur 23: Grundvattenmätserier från lokal Sörmomotet. Byggstart och färdigställning av projektet är markerat i figuren.

11.2 Stafsinge

Grundvattenmätserier från lokal Stafsinge, uppdelat på två figurer.



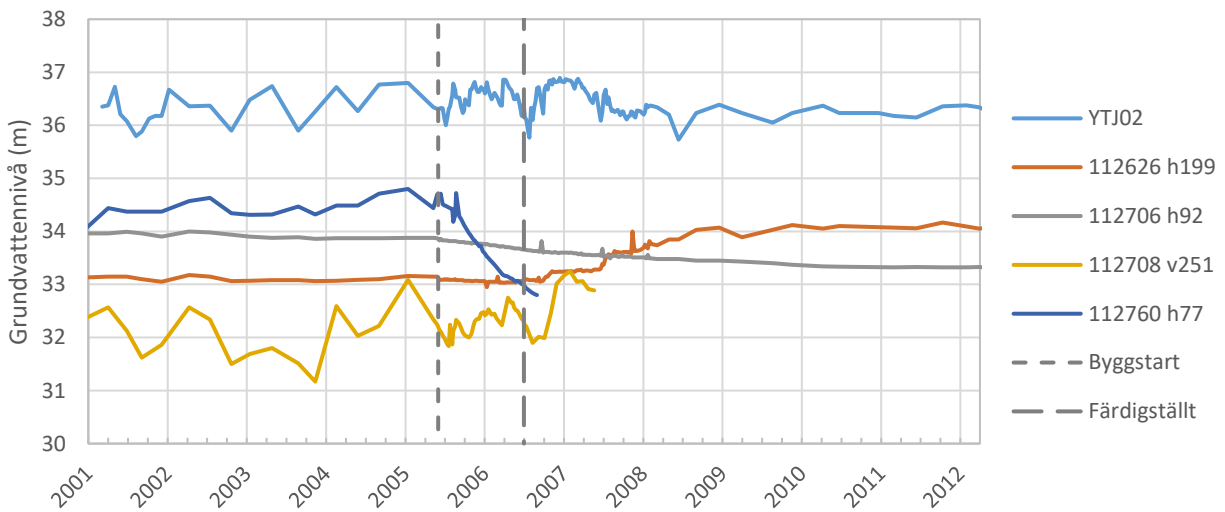
Figur 24: Grundvattenmätserier från lokal Stafsinge. Byggstart och färdigställning av projektet är markerat i figuren.



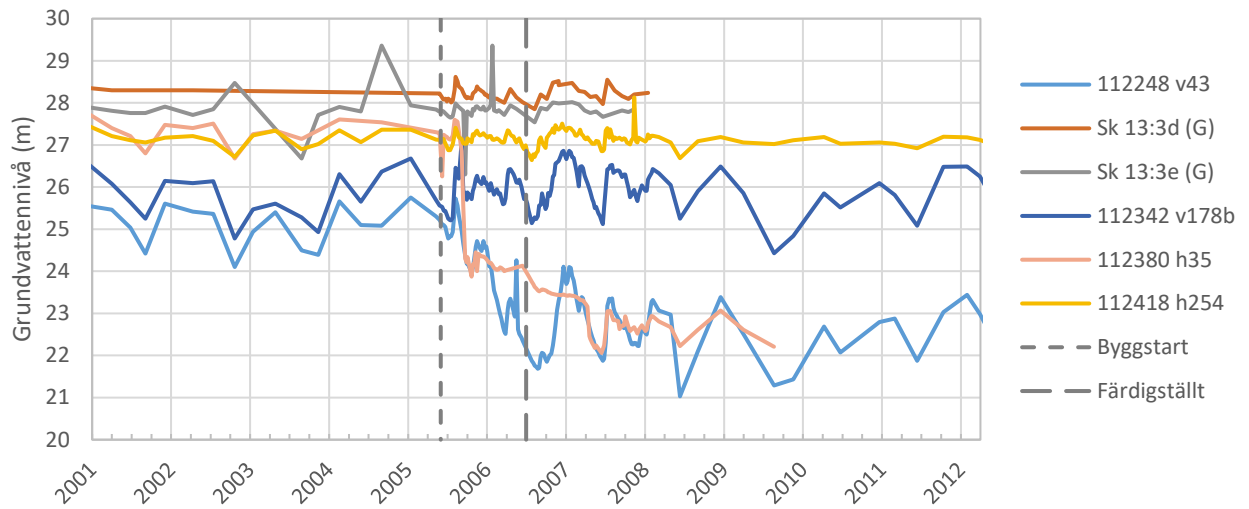
Figur 25: Grundvattenmätserier från lokal Stafsinge. Byggstart och färdigställning av projektet är markerat i figuren.

11.3 Skrea norra

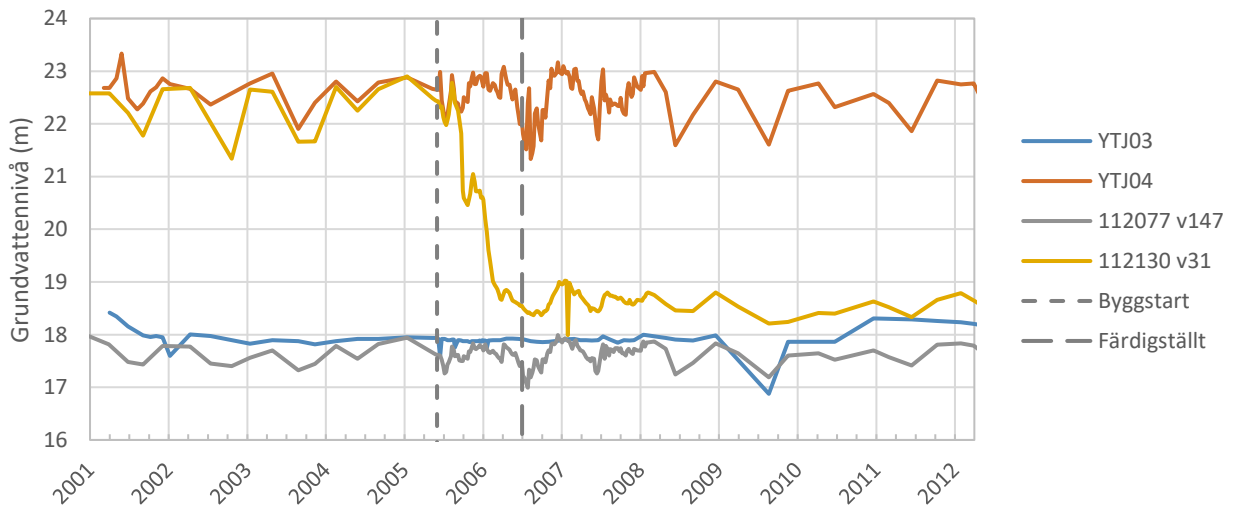
Grundvattenmätserier från lokal Skrea norra. Uppdelat på en sydlig, central och nordlig grupp grundvattenrör.



Figur 26: Grundvattenmätserier från lokal Skrea norra. Sydliga grundvattenrör. Byggstart och färdigställning av projektet är markerat i figuren.



Figur 27: Grundvattenmätserier från lokal Skrea norra. Centrala grundvattenrör. Byggstart och färdigställning av projektet är markerat i figuren.



Figur 28: Grundvattenmätserier från lokal Skrea norra. Nordliga grundvattenrör. Byggstart och färdigställning av projektet är markerat i figuren.