



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 22030

Examensarbete 30 hp

November 2022

Prognostisering av dimensionerande grundvattennivå

En fallstudie av Chalmersmodellen och hur referensrör med olika hydrogeologiska egenskaper påverkar modellens tillförlitlighet

Andrea Cedergren

Referat

Prognostisering av dimensionerande grundvattennivå- En fallstudie av Chalmersmodellen och hur referensrör med olika hydrogeologiska egenskaper påverkar modellens tillförlitlighet.

Andrea Cedergren

Grundvatten och dess varierande nivåer kan potentiellt få en stor inverkan både på byggnader och dess omgivning och kan innebära risker som upplyftande krafter, skred och ras. Baserat på detta är det av vikt att kunna förutsäga extrema grundvattennivåer, kallat dimensionerande grundvattennivåer. Däremot görs sällan mätningar under en längre tid, vilket krävs för att fastställa sannolikheten av en viss grundvattennivå. För att kunna prognostisera den dimensionerande grundvattennivån har den så kallade Chalmersmodellen utvecklats. Modellen utgår från att sätta korta mätningar från ett grundvattenrör vid en observationsplats (observationsrör) i relation till en lång mätserie från ett grundvattenrör vid en referensplats (referensrör). Enligt metoden ska val av referensrör baseras på att det är likartade förhållanden mellan de två platserna, att de ligger inom 50 km från varandra och att mätningar i referensröret utförts i mer än 20 år.

Denna studie syftar att utreda med vilken tillförlitlighet som Chalmersmodellen kan prognostisera grundvattennivåer som kan förekomma inom en viss återkomsttid. Fokus är på hur valet av referensrör som är placerade vid olikartade hydrogeologiska förhållanden påverkar Chalmersmodellens resultat.

Studien utförs som en fallstudie, med utgångspunkt i utbyggnaden av tunnelbanan i Stockholm vid Sockenplan och Station Sofia. Utgångspunkten i Chalmersmodellen är att använda grundvattennivåmätningar från observationsplatsen tillsammans med mätningar från en ostörd miljö vid en referensplats. Beräkningar görs genom att utföra databehandling och beräkningar i Python i enlighet med beskrivningar från Chalmersmodellen och utvärderas genom att jämföras mot en liknande metod kallad extremvärdesanalys. Karakterisering av platserna vid observationsrören och referensrören används för att utvärdera hur stor inverkan olika hydrogeologiska egenskaper (akvifertyp och topografiskt läge) har på beräkningarna av den dimensionerande grundvattennivån.

Resultaten visar att Chalmersmodellen generellt underskattar dimensionerande grundvattennivåer. Modellen har även varierande storleksordning av noggrannheten och därmed är det svårt att fastställa förväntad noggrannhet med Chalmersmodellen. Studien visar även att om observationsrör och referensrör är placerade vid en sluten akvifer kan en högre tillförlitlighet förväntas och osäkerheten i tillförlitligheten tycks öka för öppna akviferer. Slutligen om referensrör och observationsrör väljs utifrån att likartade hydrogeologiska egenskaper och samvariation mellan respektive grundvattennivåer, kan högre precision förväntas enligt denna studie.

Nyckelord: Grundvattennivå, dimensionerande grundvattennivå, Chalmersmodellen, extremvärdesanalys, Python, SGU

Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet Geocentrum, Villavägen 16, SE-752 36, Uppsala, ISSN 1401-5765

Abstract

Predicting extreme groundwater levels - A case study of the Chalmers model and how reference wells with different hydrogeological characteristics impact the precision of the model.

Andrea Cedergren

Groundwater can potentially have a great impact on both constructions and the surrounding areas, and high groundwater levels can involve risks such as uplifting forces and landslide. Due to these risks it is important to predict and estimate the probability of extreme groundwater levels. However, when the necessary long term measurements are not available alternative methods are needed, like the Chalmers model. The Chalmers model is used for calculating extreme ground water levels, by combining a short measurement series from an observation well with the data from a reference well. For the results to be as accurate as possible, the two wells must share similar characteristics.

The aim of this study is to investigate the Chalmers model when predicting the groundwater level for a specific return period. Focus will be on how the choice of different reference wells, with different characteristics, will influence the accuracy of the model.

A case study will be conducted on two station sites (Sockenplan and Station Sofia) for the extension of the metro in the southern part of Stockholm, Sweden, upon which the Chalmer model will be implemented. The different characteristics of the observation and reference wells are tested to evaluate the accuracy of the model. The accuracy will be evaluated by using extreme value analysis as an alternative calculation model, assumed to be more precise, and compare the difference in extreme groundwater levels. The measurements used as reference in the Chalmers model are public data from The Geological Survey of Sweden, SGU, for groundwater levels. Data processing and calculations are performed in python.

This study highlights the difficulties in determining the accuracy of the Chalmers model when predicting extreme groundwater levels, and no specific expected accuracy has been determined. Generally, the model appears to underestimate extreme groundwater levels. Furthermore, if the observation well and reference well are located by a confined aquifer and between inflow- and outflow areas, a higher precision can be expected. The uncertainty of the model increases with an unconfined aquifer. The results also imply that if the reference well and the observation well are selected based on similar hydrogeological characteristics, a covariation of groundwater levels over time and between highest and lowest level, a higher accuracy can be expected.

Keywords: Groundwater level, extreme groundwater level, Chalmers model, extreme value analysis, Geological Survey of Sweden, Python.

Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Science, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36, Uppsala, ISSN 1401-5765

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 HP inom civilingenjörsprogrammet inom miljö- och vattenteknik, vid Uppsala Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet. Projektet genomfördes på Geosyntec Consultants i Stockholm med handledning av Fredrik Alderman och ämnesgranskare Roger Herbert, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.

Jag vill till att börja med ägna ett stort tack till min handledare Fredrik Alderman som stöttat och guidat mig under hela mitt examensarbete. Även stort tack till Geosyntec för möjligheten att få skriva mitt examensarbete hos er och att jag blivit så väl omhändertagen. Tack också till min ämnesgranskare Roger Herbert för all vägledning och hjälpsamma råd under arbetets gång.

Dessa år har stundtals varit tuffa och hade inte varit möjliga att utföra om det inte vore för alla vänner, med er blir livet en fest. Tack också till Jakob som alltid varit uppmuntrande och ett stort stöd under hela min studietid.

Andrea Cedergren
Uppsala, September 2022

Populärvetenskaplig sammanfattning

Tillförlitligheten vid uppskattning av framtida grundvattennivåer

Andrea Cedergren

Byggnader, närliggande områden och människor kan utsättas för stora risker om inte grundvattnets nivåer i marken beaktas. Grundvattennivåer kan potentiellt påverka byggnader genom att verka med upptryckande krafter underifrån och omgivningen genom att grundvattnet bidrar till att minska markens förmåga att hålla ihop. Därför är det viktigt att även veta hur stor sannolikheten är att en viss grundvattennivå kan uppstå inom ett längre tidsperspektiv, när exempelvis en ny byggnad ska anläggas.

I det här arbetet har en modell, Chalmersmodellen, testats för att kunna förutsäga vilken högsta grundvattennivå man kan förvänta sig i framtiden. Modellen använder mätningar som gjorts från platsen man vill förutsäga grundvattennivån för och jämför mot andra mätningar i närheten som gjorts under en lång tid. Speciellt har arbetet tittat på hur bra modellen fungerar när olika platser, med olika förhållanden som kan påverka grundvattennivån, används.

Det visar sig att det är svårt att kunna se något generellt mönster för hur exakt Chalmersmodellen kan uppskatta framtida grundvattennivåer. Ett oväntat resultat från arbetet var att Chalmersmodellen ofta underskattar framtida högsta grundvattennivåer. Däremot tycks uppskattat värde av grundvattennivån bli mer exakt om de jordlagren som grundvattnet samlas i vid de två platserna är skilt från atmosfären av exempelvis ett lager av lera (sluten akvifer). Det ses också att om jordlagren där grundvattnet samlas har kontakt med atmosfären (öppen akvifer) blir uppskattningen av högsta grundvattennivåer mer osäkra. Om de två platserna är lika varandra och nivåerna av grundvatten beter sig på liknande sätt tycks modellen bli mer exakt.

För att testa om Chalmersmodellen kan förutsäga höga grundvattennivåer har mätningar använts från två nya tunnelbanestationer som ska byggas i södra Stockholm, Station Sofia och Sockenplan (observationsrör). Dessa mätningar har använts tillsammans med andra platser inom Stockholmsområdet där mätningar av grundvattennivån har gjorts under en lång tid (referensrör). Olika kombinationer av typ av akvifer och vart i akviferen mätningarna gjordes mellan observationsrör och referensrör undersöktes. Detta för att se om olika egenskaper kan påverka hur exakt Chalmersmodellen kan förutsäga en högsta grundvattennivå. För att kunna säga hur exakt Chalmersmodellen är har ytterligare en metod som används för att förutsäga grundvattennivåer för framtiden använts. Denna modell har antagits vara den mest exakta och genom att jämföra hur stor skillnaden i grundvattennivån som tagits fram med Chalmersmodellen skiljer sig från denna så har exaktheten kunnat undersökas.

Arbetet visar att det är svårt att uppskatta hur exakt Chalmersmodellen kan bli, där nivån ofta underskattar framtida grundvattennivåer. Däremot kan en bättre uppskattning av grundvattennivån fås om akviferen är sluten, jämfört mot öppen. Om grundvattennivåer följer varandra över tid och egenskaperna mellan referensrör och observationsrör är lika borde uppskattade grundvattennivåer bli mer exakta.

Innehåll

1 Inledning	1
1.1 Syfte och frågeställningar	2
1.2 Avgränsningar	2
2 Bakgrund	3
2.1 Hydrologiska cykeln	3
2.2 Grundvatten och grundvattenbildning	4
2.3 Jordlager	4
2.4 Grundvattenförekomster	5
2.4.1 Grundvattenmagasin och akvifer	5
2.5 Grundvattnets nivåfluktuationer	6
2.6 Grundvattenundersökning	7
2.7 Markstabilitet och grundvattnets inverkan	8
2.7.1 Vikten av att utreda grundvattennivåer	9
2.7.2 Skred och ras	9
2.7.3 Hydrauliskt upptryck	10
2.8 Beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer	11
2.8.1 Återkomsttid	11
2.8.2 Extremvärdesanalys	11
2.8.3 Chalmersmodellen	12
2.8.4 Statistisk bearbetning av den långa mätserien	14
2.9 Standarder för geoteknisk dimensionering	15
2.9.1 Eurokoder	16
2.9.2 Geoteknisk dimensionering inom Eurokod	16
2.9.3 Implementering av geotekniska standarder i Sverige	17
3 Fallstudie- utbyggnaden av Stockholms tunnelbana	18
3.1 Regionalgeologi i Stockholm	19
4 Metod	20
4.1 Höjdsystem	20
4.2 Arbetsgång	20
4.3 Selektion och karakterisering av observationsrör	21
4.4 Selektion och karakterisering av referensrör	22
4.5 Bearbetning och beräkningar	23
4.5.1 Bearbetning och beräkningar med Chalmersmodellen	23
4.5.2 Bearbetning och beräkningar med extremvärdesanalys	24
4.6 Evaluering av dimensionerande grundvattennivåer	25
4.7 Jämförelse med referensrör som observationsrör	27
4.8 Analys av normalfördelning	28
5 Studieområde Station Sofia	29
5.1 Översiktlig beskrivning av arbetsområdet för Station Sofia	29
5.2 Platsbeskrivning av observationsrör T67C92U	30
5.3 Platsbeskrivning observationsrör T66D781U	30

5.4	Platsbeskrivning av observationsrör 13CW403U	31
5.5	Platsbeskrivning av observationsrör TGW1101	31
5.6	Sammanfattande hydrogeologiska egenskaper vid Station Soifia	32
6	Studieområde Sockenplan	34
6.1	Platsbeskrivning av observationsrör 106B206 och 15X027	35
6.2	Platsbeskrivning observationsrör 106B188	36
6.3	Platsbeskrivning observationsrör 106B177	36
6.4	Sammanfattande hydrogeologiska egenskaper vid Sockenplan	36
7	Resultat	38
7.1	Jämförelse av hydrogeologiska egenskaper	38
7.2	Jämförelse av samvariation av grundvattennivåer i utvalda observationsrör	42
7.2.1	Nivåvariationer i slutna akviferer	42
7.2.2	Nivåvariationer i öppna akviferer	44
7.2.3	Nivåvariationer i öppna/undre akviferer	44
7.3	Dimensionerande grundvattennivåer då referensrör används som observationsrör	46
7.3.1	Tillförlitlighet med olika referensrör	46
7.4	Analys av samvariation av grundvattennivåer under observationstiden	48
7.5	Normalsannolikhetsdiagram	49
8	Diskussion	50
8.1	Chalmersmodellens tillförlitlighet	50
8.2	Koppling till val av referensrör och Chalmersmodellens noggrannhet	51
8.3	Studiens styrkor och svagheter	53
8.4	Framtida studier	54
9	Slutsatser	55
A	Frekvensfaktorer	I
B	Hydrogeologiska egenskaper för referensrör	I
C	Datamängd för referensrör och observationsrör	I
D	Grundvattennivåer med referensrör som observationsrör	I
E	Normalsannolikhetsdiagram över referensrör	II
F	Normalsannolikhetsdiagram för observationsrör	II

Ordförklaring

- Hydrogeologi: läran om grundvatten, dess rörelse, förekomst och egenskaper
- Akvifer: geologisk bildning med hög vattengenomsläpplighet och kapacitet för lagring av grundvatten
- Porositet: den sammanlagda volymen porer av den totala volymen berg- eller jordart
- Permeabilitet: den materialspecifika förmågan att släppa igenom vatten
- Transpiration: avdunstning av vatten från växter och andra organismer
- Hydraulisk konduktivitet: markens vattengenomsläpplighet som kan rinna igenom marken på en viss tid
- Perkolering: vertikal transport av vatten i marken
- Fältkapacitet: Mängden vatten i marken efter att överskottsvatten dränerats bort
- skjuvhållfasthet: Motståndet mot kraft som innebär deformation utan volymändring
- Fältkapacitet: mängden markvatten som återstår efter dränering av överskottsvatten
- Sondering: den geofysiska bestämningen av markens egenskaper vid olika djup

1 Inledning

Grundvattnytan kan ha stora variationer mellan olika årstider och över längre tidsspann. Grundvattennivån kan i sin tur få en betydande inverkan på både konstruktioner och omgivningen, genom att påverka jordens hållfasthet och utsätta konstruktioner för olika typer av laster. Om inte detta beaktas kan exempelvis brott i konstruktioner uppstå eller att närliggande områden utsätts för deformationer. Vilket kan utsätta byggnader, omgivningen och i sin tur människor för stora risker och skador (MSB [u.å.](#)).

Genom att det finns en tydlig koppling mellan markens hållfasthet och grundvattennivåer och som påverkar risker för brott är det därför av stor vikt att förutsäga sannolikheten för att en viss grundvattennivå kan förekomma. Många byggnationer har dessutom långa livslängder och ett behov finns av att utveckla metoder för att förutsäga grundvattennivån i framtiden. Men att göra denna prognostisering av grundvattennivåer är utmanande och ofta görs nivåmätningar av grundvattnet vid anläggningsarbeten inom en begränsad tid.

För att kunna förutsäga sannolikheten för en viss grundvattennivå, trots ett begränsat antal mätningar, har en modell som i denna studie kallas för Chalmersmodellen utvecklats. Denna beräknar en grundvattennivå för en specifik återkomsstid. Detta görs genom att mätningar från den korta mätserien sätts i relation till en längre mätserie (Svensson & Sällfors [1985](#)). Mätningarna görs från ett grundvattenrör vid platsen som den dimensionerande grundvattennivå ska uppskattas för, observationsrör, och mätningar från grundvattenrör med en lång mätserie från ett så kallat referensrör.

Valet av ett referensrör i förhållande till ett observationsrör bör enligt modellen väljas utifrån att båda är placerade inom samma klimatzon och att dess grundvattenmagasin har likartade karakteristik (Svensson [1984](#)). Att ha i åtanke är att det finns många faktorer, exempelvis jordarter, geografisk placering och mänsklig inverkan som kan påverka grundvattnets ytvariationer över tid och hur höga eller låga dessa kan bli. Men beskrivningen som ges i denna metod kan anses vara något vag, bland annat hur stor inverkan olika hydrogeologiska egenskaper har eller hur den topografiska placeringen påverkar modellens tillförlitlighet framgår inte.

Frågan är därmed hur resultatet från dessa beräkningar påverkas av vilket referensrör som används i förhållande till ett observationsrör? Samt med vilken noggrannhet som kan förväntas då Chalmersmodellen används för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer och hur påverkas modellens tillförlitlighet.

Ämnesområdet är även aktuellt genom att Sveriges Geotekniska Förening, SGF, har påbörjat ett projekt i syfte att ta fram en handledning för framtagande av dimensionerande grundvattennivåer (SGF [2021](#)). Projektet ser över regelverk, skisser för typfall och hur branschen arbetar och hanterar dimensionerande grundvattennivåer. Stor vikt läggs på hur grundvatten och anläggningar samverkar. Kopplat till detta är förhoppningen att kunna bidra till hur dimensionerande grundvattennivåer hanteras.

1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att granska Chalmersmodellens noggrannhet och tillförlitlighet med avseende på prognostisering av dimensionerande grundvattennivåer och utvärdera hur valet av referensrör kan påverka resultatet från denna beräkningsmodell.

För att kunna uppnå syftet med denna studie ska följande frågeställningar besvaras:

- Med vilken noggrannhet kan Chalmersmodellen prognostisera dimensionerande grundvattennivåer?
- Hur påverkar specifika hydrologiska faktorer Chalmersmodellens tillförlitlighet vid prognostisering av dimensionerande grundvattennivåer?
- Hur påverkas tillförlitligheten i beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer om opåverkade förhållanden råder jämfört mot påverkade förhållanden?

1.2 Avgränsningar

Denna studie är begränsad till att undersöka akvifertyp och topografiskt läge som hydrogeologiska faktorer som påverkar observationsrören och referensrören och hur dessa kan komma att påverka Chalmersmodellens tillförlitlighet. Vidare har andra faktorer exkluderats i denna studie, exempelvis har inte meteorologiska faktorer, så som nederbörd och temperatur, undersökts.

Ytterligare begränsning i denna studie är att Chalmersmodellens statistiska och matematiska beräkningssätt inte har undersökts och även modellens val av metod för att beräbta och behandla datamängder. Bland annat har inte längderna på dataserierna som använts testats för hur dessa påverkar Chalmersmodellens tillförlitlighet vid beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer.

Denna studie är även begränsad till att enbart utgå från hur Chalmersmodellen beräknar dimensionerande grundvattennivåer i jord akviferer.

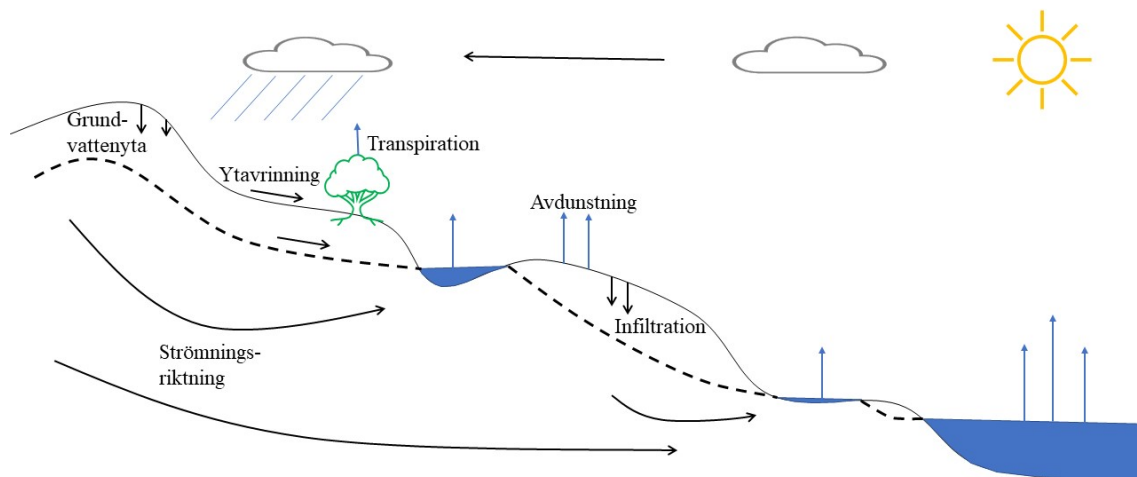
2 Bakgrund

I detta avsnitt beskrivs principer och begrepp för att ge en fördjupad förståelse för ämnesområdet. Detta inkluderar beskrivningar av processerna och vilka faktorer som påverkar hur grundvatten bildas, lagras och strömmar. Ytterligare bakgrund om grundvatten och hur dess varierande nivåer påverkar konstruktioner beskrivs. Avsnittet redogör också översiktligt för de standarder där dimensionerande grundvattennivåer används.

Den modell för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer, Chalmersmodellen, som utvärderas i denna studie och den modell som används för att evaluera Chalmersmodellens noggrannhet beskrivs även i detta avsnitt.

2.1 Hydrologiska cykeln

Grundvattenet är en del av hela den hydrologiska cykeln och påverkas därför av hydrologiska, geologiska, topografiska, biologiska och klimatologiska processer och förlopp. Utifrån detta är det betydelsefullt att förstå hela cykeln för att få en förståelse för den del som är under markytan (Knutsson & Morfeldt [1995]). Den hydrologiska cykeln beskriver de kontinuerliga processer som styr vattnets rörelser och består av tre huvuddelar som innefattar det atmosfäriska vattensystemet, ytvattensystemet och systemet som beskriver flöden under marken, se figur 1.



Figur 1: Översiktlig visualisering av den hydrologiska cykeln och ingående processer (efter SMHI u.å.).

Den hydrologiska cykeln beskrivs genom att vatten avdunstar från vatten- och landtytor och kondenseras, för att avges i någon form av nederbörd. Uptag från markytan sker via vegetation, avrinning, infiltration, strömmar genom marken eller ytavrinning (Todd & Mays [2005]). Den hydrologiska cykeln innefattar också evapotranspiration, vilket är avdunstning från mark och ytvatten samt transpiration av vatten som absorberats av vegetation.

Nederbörd kan genom perkolation infiltrera djupare ner i marken och bidra till grundvattenbildning (Todd & Mays 2005). Efter varierande tid kan grundvattnets sedan återföras till markytan genom växtupptag, kapillär uppströmning till hav, sjöar eller ytvattendrag. Vatten kommer sedan återigen kunna avdunsta och avges som nederbörd (Knutsson & Morfeldt 1995).

2.2 Grundvatten och grundvattenbildning

Grundvatten definieras som vatten som fyller porer och hålrum i marken och portrycket är antingen lika eller högre än atmosfärstrycket. Vattnet under markytan kan förekomma i form av is, vattenånga eller flytande form. Rörligheten kan vara allt från fritt strömmande till kemiskt bundet (ibid.).

Grundvattenbildning definieras som nedåtriktade flöden av vatten som når grundvattnet och bidrar med tillförsel till ett grundvattenmagasin, det vill säga en del av jord- eller bergprofilen som har en tydligt högre hydraulisk konduktivitet än de delar med minst genomsläpplighet i profilen (Ödlund Eriksson 2020). Bildningen sker främst genom att vatten från olika typer av nederbörd (snö, regn, hagel). Det översta jordlagret dämpar och fördelar flöden av vatten och gör att vattenflöden fördelas över tid (Gilli et al. 2011). Hur stor andel vatten som infiltreras beror på flertalet faktorer, som vad det är för typ av nederbörd, nederbördens intensitet och varaktighet. Den beror även på terrängens beskaffenheter, markstruktur och jordmånstyp. Markens tillstånd (exempelvis om den är upptorkad), läge på grundvattnets nivå och berggrundens och jordartens förmåga att släppa igenom vatten påverkar också (Knutsson & Morfeldt 1995). Förhållanden som är gynnsamma för infiltration är grovkorniga jordarter, låg fuktighet i jorden eller om det översta jordlagret är poröst (Fetter 2014).

2.3 Jordlager

Som nämnt i tidigare avsnitt påverkas grundvattenbildningen av jordens egenskaper. Förmågan att hålla kvar eller släppa igenom vatten påverkas till största del av jordens kornstorlek och packning. För att kunna bedöma vart och på vilket sätt grundvatten magasineras är det av stor vikt att veta vad jorden har för egenskaper. Detta påverkas av typen av jordart som bestäms utifrån dess kornstorleksfördelning och benämns som ler, silt, sand, grus, sten och block. Det är vanligt att ett jordlager består av flera utav dessa, exempelvis siltig sand.

Leror är en typ av jordart som vanligen avsätts på botten av sjöar och hav som sediment. En lerpartikel är mindre än 0,002 mm i diameter och enskilda korn kan inte urskiljas med blotta ögat. Lera har en mycket hög förmåga att hålla kvar vatten och ett jordlager med lera är därför inte vattengenomsläppligt. Siltjordar består av korn som är mellan 0,002-0,06 mm i diameter. Denna jord är oftast fast under torra förhållanden, men har en förmåga att kunna hålla kvar vatten (SGI 2022).

Sand och grus är jordarter som ofta är blandade med varandra. Sand har kornstorlek mellan 0,06-2 mm och grus mellan 2-60 mm i diameter. Motsatt till lera och silt har sand och grus en hög vattengenomsläpplighet. Jordarterna räknas som friktionsjordar, vilket betyder att jordens hållfasthet främst utgörs av friktionskraften mellan kornen. Ytterligare en friktionsjord är morän. Detta är sveriges vanligaste jordart och underlagrar ofta andra jordarter. Morän har bildats genom materialavlagringar från inlandsisen, till följd av detta förekommer ingen kornstorleksortering

och morän räknas som en osorterad jordart. Jorden kan utgöras av sten och block som är utspridda i finkornigt material. Sammansättningen i en morän kan vara mellan finkornig lermorän till grovkornig grusmorän (SGI [2022](#)).

2.4 Grundvattenförekomster

Som tidigare nämnt är grundvattenbildningen beroende av klimatet, topografi, hydrologi och geologi inom ett terrängområde. Däremot är förekomsten av grundvatten i första hand beroende av hur vattnet kan uppträda, strömma och magasineras. I detta avsnitt beskrivs olika förhållanden och olika klassificeringar av grundvattenförekomster.

2.4.1 Grundvattenmagasin och akvifer

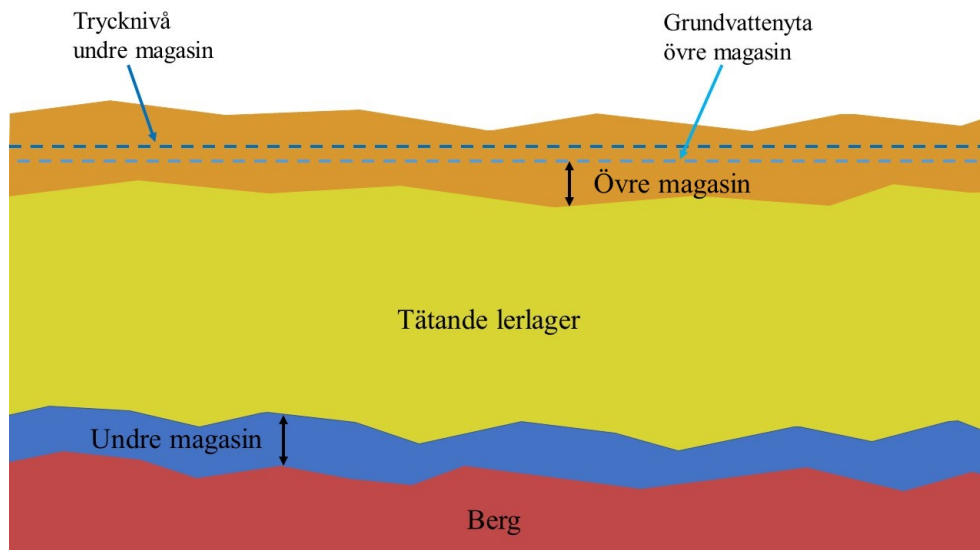
Grundvatten kan förekomma i varierade geologiska formationer som har en tydligt högre hydraulisk konduktivitet. Vid lagring av grundvatten används ofta begreppet akviferer, som definieras som en formation som innehåller tillräckligt med permeabelt material så att en betydande mängd vatten, ur ett ekonomiskt perspektiv, kan lagras och utvinnas. Trots denna definitionen av akviferer används detta begrepp i denna studie, utan egentligt fokus på just den ekonomiska betydelsen, vid lagring av vatten.

Vidare finns det även flera olika typer av klassifikationer på akviferer, exempelvis grundvatten som strömmar i sprickbildningar i berg, genom vidgade sprickor och grottor. Denna studie kommer däremot att utgå från så kallade porakviferer där grundvattnet magasineras i jord.

En porakvifer kan vara under slutna förhållanden och kallas för slutna akvifer. Detta är en typ av akvifer som har grundvatten inneslutet av ett impermeabelt material både på dess under- och översida, av exempelvis lera. Grundvattnet är skiljt från atmosfären och dessa förhållanden skapar ett tryck som överstiger atmosfärstrycket. Portryckshöjden definieras därför som den punkten där höjden är den samma som atmosfärstrycket i den slutna akviferen och benämns som grundvattentryckyta (SGU [2019a](#)). Vatten tränger in i den ytan av den slutna akviferen som går uppåt i riktning mot markytan. Höjningar och sänkningar av nivåerna påverkas främst av förändringar av trycket snarare än förändringar av lagrad volym vatten (Todd & Mays [2005](#)).

Det finns även öppna akvifer, som innebär att grundvattnet har direkt kontakt med atmosfären. Grundvattnets portryckshöjd kommer alltså att vara samma som atmosfärstrycket och definieras som den öppna akviferens fria grundvattentyta (SGU [2019a](#)). Fluktuationer av grundvattennivån motsvarar förändringarna av volymen vatten som lagras i akviferen (Todd & Mays [2005](#)). En öppen akvifer ligger oftast närmre markytan än slutna akviferer, vilket innebär att variationer av exempelvis nederbörd får tydligare direkt inverkan på grundvattennivån (USGS [u.å.](#)).

Ytterligare en annan typ av akviferer är läckande akviferer. Vatten kan lättare tillföras och lämna dessa typer av akviferer då de underlagras eller överlagras av ett semi-permeabelt skikt. Trots denna uppdelning av olika typer av akviferer så är det viktigt att ha i åtanke att det ofta förekommer olika akviferssystem i samma lagerföljd.



Figur 2: Olika typer av grundvattenytor och förekomsten av övre- och undre grundvattenmagasin i jordlager (efter Ödlund Eriksson 2020)

I de fall det förekommer akviferer i olika jordlager benämns dessa som övre- och undre grundvattenmagasin, se figur 2. Ett övre grundvattenmagasin ligger i ett lager där det förekommer grundvatten i antingen friktionsjord eller fyllning ovanpå ett mindre genomsläppligt jordlager. Det är också vanligt förekommande att det finns ett lager av morän, bottenmorän, ovanpå bergövertytan. Denna morän är ofta överlagrad av andra jordlager och detta kan då utgöra ett undre grundvattenmagasin (Ödlund Eriksson 2020).

2.5 Grundvattnets nivåfluktuationer

Grundvattennivån kan beroende på olika förhållanden variera och är därför dynamisk över tid. Fluktuationerna av grundvatten kan orsakas av flera olika faktorer, såväl naturliga som mänskliga. Det är även ofta flera faktorer som samverkar samtidigt (Svensson 1984).

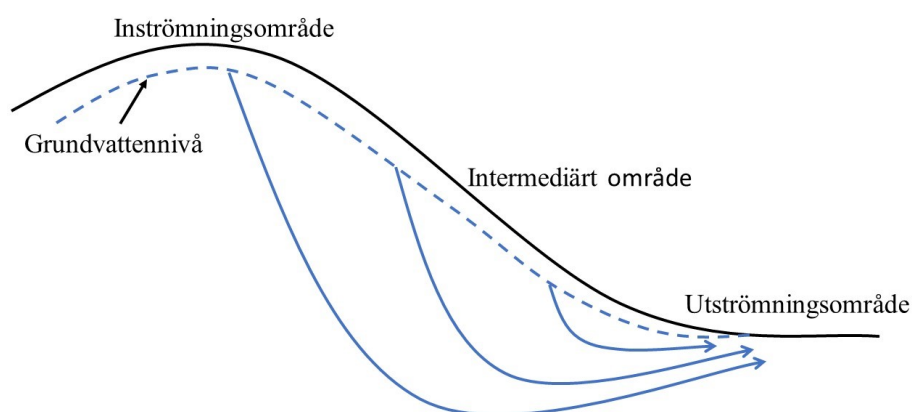
Fluktuationer av grundvattennivåer påverkas av säsonger genom att nivåerna höjs under perioder med mycket nederbörd och sjunker vid motsatta förhållanden (Fetter 2014). Detta betyder att grundvattennivån har en direkt koppling till meteorologiska variationer, både till följd av variationer över året och under längre tid (Svensson 1984). Nederbördens varaktighet och intensitet vid temperaturen över 0°C kommer ge en någorlunda direkt effekt på grundvattennivån. Vid kallare temperaturer ackumuleras nederbörd och tillskott sker vid smältning. Dessa förhållanden varierar mellan år, vilket följaktligen påverkar grundvattennivån (ibid.).

Hur stor andel av nederbörden som kan höja grundvattennivån beror även på markförhållanden, som också påverkas av årstider. Bland annat tar växtrötter upp en stor del av vattnet som infiltreras i marken. Under vegetationsperioder ökar växters upptagningsförmåga och tillförsel av grundvatten minskar (ibid.). Markens fuktighet har också en inverkan på andelen vatten som kan perkolera nedåt i marken. Om fältkapacitet i zonen ovanför grundvattnet har uppnåtts kan nedsjunkning ske lättare (Knutsson & Morfeldt 1995).

Trots att grundvattnets fluktuation står i nära relation med meteorologiska faktorer är det ofta en fasförskjutning över tid från den tidpunkten då vatten infiltrerar marken tills dess att det når grundvattenzonen. Genom att det infiltrerade vattnet kan dröja sig kvar i marken kan det stegvis förskjutas nedåt (Svensson 1984).

Storleken på grundvattenfluktuationerna beror också på vattengenomträngligheten, den omättade zonen mäktighet samt akviferens utbredning (Knutsson & Morfeldt 1995). En akvifers effektiva porositet har stor inverkan på hur hög amplituden på grundvattennivån blir. Med en hög porositet krävs det mer vatten för att fylla upp porerna, detta gör att amplituden blir lägre (Svensson 1984). Exempelvis i utbredda grusavlagringar kan nivåvariationerna vara några decimeter, medan om jordarten består av grov morän kan variationerna istället bli meterstora. Däremot spelar den porositeten en mindre roll i slutna akviferer, eftersom nivåförändringarna beror på vattentrycket som fortplantas (Knutsson & Morfeldt 1995).

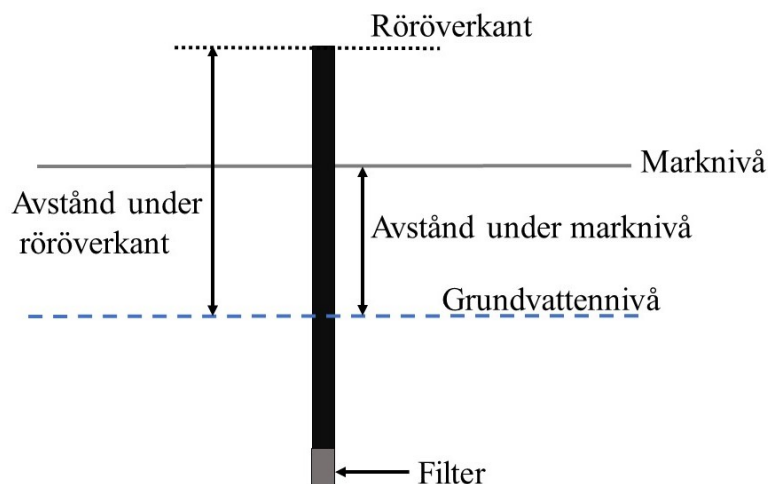
Grundvattennivån påverkas också av topografin, som översiktligt kan delas in i inströmnings- och utströmningsområden. Områden för inströmningsområden befinner sig oftast i topografiska höglägen, medan utströmningsområden ofta är i topografiska låglägen (Fetter 2014). Förenklat betyder detta att strömningslinjerna för grundvatten ofta är vertikalt nedåtriktade vid inströmningsområden, medan de är uppåtriktade vid utströmningsområden (Svensson 1984). Nära markytan är strömningslinjerna kortare, för att bli längre ju djupare ner i markprofilen (ibid.). Områden som befinner sig mellan inströmnings- och utströmningsområden kallas för intermediärt område och kan tidvis vara utströmningsområden och tidvis inströmningsområden, se figur 3 (SGU 2019b).



Figur 3: Förenklad illustration samt benämningar för indelade områden för strömningsriktningarna (efter Nationalencyklopedin u.å.).

2.6 Grundvattenundersökning

Mätningar av grundvattennivåer har som syfte att studera tidsmässiga variationer och det vanligaste sättet är att utföra mätningar från ett så kallat grundvattenrör i jord. Utformningen på grundvattenröret när enbart grundvattennivån mäts som en parameter bör i regel vara 50 mm i diameter. Delen av grundvattenröret som är installerad under mark bör ha en perforerad rörspets och som vid installation spolats igenom för att ett filter ska byggas upp utanför, se figur 4. Det förekommer även grundvattenrör som har inbyggda filter, men bör undvikas då dessa kan sättas igen av finare material (Havs- & vattenmyndigheten 2018).



Figur 4: Översiktsbild av ett grundvattenrör för mätningar av grundvattennivåer (efter Havs- & vattenmyndigheten [2018](#))

Grundvattennivån anges som cm under markytan eller meter över havet. Grundvattennivåerna kan övervakas på flera olika sätt, bland annat genom manuella mätningar. Dessa mätningar utförs antingen med ett klucklod som är utformad med en tyngd på ett måttband och avger ett kluckande ljud då tyngden når vattenytan. Ett ljud/ljuslod fungerar på ett likartat sätt som klucklodet, men har en elektronisk indikator när lodet når vattenytan (Havs- & vattenmyndigheten [2018](#)). Det finns även automatiserade mätningar som görs genom sensorer, oftast tryckgivare.

Som tidigare nämnt skiljer sig grundvattennivåerna beroende på om det är en öppen eller sluten akvifer. Om det är en sluten akvifer mäts grundvattentstryckyta och om det är en öppen akvifer mäts den fria grundvattenytan. Trots att det är en distinktion mellan dessa två benämner denna studie båda dessa som grundvattennivåer.

2.7 Markstabilitet och grundvattnets inverkan

Konstruktioner av olika slag, exempelvis ett flerbostadshus eller en tunnel, kan på olika sätt komma att påverkas av grundvatten. Detta bör därför beaktas då kapaciteten för en viss konstruktion bestäms, dimensioneras, både med hänsyn till dess egna hållfasthet och inverkan på närområdet. Att inte beakta grundvatten vid byggnadsarbeten kan komma att innebära stora skador och utsätta allmänheten för höga risker. Dessutom uppskattas mark- och grundläggningsarbeten uppgå till 20% av de totala anläggnings- och byggnadskostnaderna. I och med detta är många geotekniska frågeställningar kopplade till grundvatten och förståelsen för hur en konstruktion och omgivningen påverkas.

I detta avsnitt beskrivs vilket sätt grundvattennivåer används för att ta fram en säkerhetsfaktor för att beakta de laster och deformationer som kan orsakas av grundvatten. Avsnittet lyfter även exempel på hur grundvatten kan påverka en konstruktion och hur höga grundvattennivåer kan påverka markförhållanden.

2.7.1 Vikten av att utreda grundvattennivåer

Som nämnt i det inledande avsnittet till denna studie kan grundvatten utsätta byggnader, omgivande miljöer och människor för skador och deformationer. Vilket betyder att grundvattnets inverkan på konstruktioner och omgivningen kan bli både riskfyllda och kostsamma. Baserat på detta krävs det en säkerhetsmarginal mot att detta inte sker vid dimensionering av konstruktioner. Inom geotekniken är det vanligt att en säkerhetsfaktor (F) används, som definieras som kvoten mellan hållfastheten (τ_f) och mobiliserad skjuvspänning (τ_{mob}):

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Vid frågeställningar som berör stabilitet för schakt, lastförmågan för en byggnader eller stabiliteten för en slänt används ekvation [1]. Beräkningar av (τ_{mob}) görs genom givna geometrier och laster som verkar på konstruktionen. För att beräkna (τ_f) behöver jordens egenskaper beaktas, vilket i vissa fall ses som en materialkonstant. Däremot under förhållanden där vattenströmning i marken upphört och portrycket är i jämvikt, dränerad analys, är hållfastheten beroende av bland annat effektspänningarna i jorden (σ'), se ekvation [2] (Svensson & Sällfors [1985]).

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

c' = inre kohesion

ϕ' = inre friktionsvinkel

σ' = effektspänning

Effektspänningen anger kontaktrycket som råder i samma punkt som bland annat beskrivs av det totala trycket (σ), vilket är tyngden från ovanliggande massor, eventuella andra laster samt spridningen av trycket från dessa laster i materialet som uppstår av spänningsomlagringar och och skjuvkrafter. Effektspänningen är även beroende av att det totala trycket i ett vattenmättat material i den aktuella punkten och portrycket (u):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

σ = totalspänning

u = portryck

Portrycket har en stark korrelation med grundvattennivån som alltså även påverkar skjuvhållfastheten. Detta betyder att grundvattnets nivåvariationer har en stark inverkan på hållfastheten och därmed också avgörande för riskerna för brott på konstruktioner. Med detta som grund krävs det att en dimensionerande grundvattennivå kan uppskattas som en del i dimensioneringen av en konstruktion.

2.7.2 Skred och ras

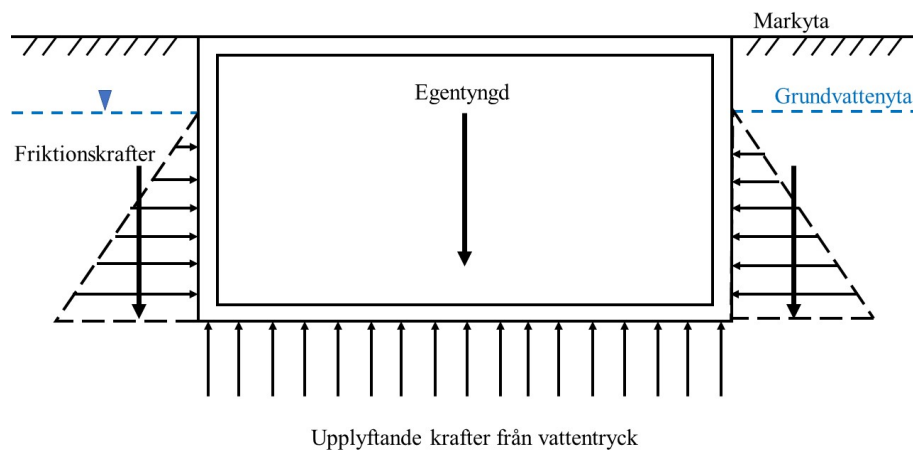
Skred och ras kan uppstå både till följd av naturliga orsaker och till följd av mänsklig påverkan från olika typer av anläggningar, så som byggnader, vägar, tunnlar eller dammar. Stabiliteten i en slänt påverkas av jordens egenskaper och sammansättning, topografiska förhållanden och grundvattenförhållanden. Skred kan inträffa till följd av att brott uppstår längs med en glidyta i markprofilen. Jordlagren som ligger ovanför glidytan kan både påverkas av pådrivande och

mothållande krafter. Innan ett skred uppstår är dessa i jämvikt, men då denna rubbas kan ett skred utlösas. Jämvikten kan rubbas genom ökad belastning, minskad motvikt eller försämrade hållfasthet i jorden (MSB [u.å.](#)).

Om exempelvis grundvattennivåer höjs kommer trycket på porer i jorden att öka och riskerar att leda till försämrade hållfasthet och stabilitet ([ibid.](#)). Med höjda grundvattentryck minskar effektivtrycket (kontakttryck) mellan jordkornen och medför att hållfastheten minskar. I de flesta fall innebär ökade grundvattentryck en större sannolikhet för skred eller ras ([ibid.](#)). Med detta som bakgrund framgår vikten att ha kunskap om sannolikheten för höga grundvattentryck vid riskbedömningar för skred och ras.

2.7.3 Hydrauliskt upptryck

I de fall en konstruktion anläggs under grundvattnets nivå trycks vatten undan och konstruktionen kommer att utsättas för ett hydrauliskt upptryck. Det vertikala trycket ökar på konstruktionens bottenplatta om den placeras längre ner under grundvattnet. Lasten som den utsätts för kommer att öka linjärt med djupet under grundvattnets nivå, trycket ökar med 10 kN/m^2 per djup angivet i meter (Akfidan & Sadek [2012](#)).



Figur 5: Upplyftande- och motverkande krafter från grundvattentrycket som verkar på en konstruktion nedsänkt under grundvattnets nivå (efter CEN [2007](#)).

Konstruktionens egentyngd och jordkornens förmåga att motstå att röra sig i förhållande till varandra (skjuvmotstånd) är betydande krafter som kan anses vara motverkande mot den vertikalt uppåtriktade kraften från vattentrycket. För att motverka brott krävs det att konstruktionen dimensioneras på ett sådant sätt att de pådrivande lasterna ska vara mindre än de mothållande lasterna, se figur [5](#) (Trafikverket [2016a](#)).

2.8 Beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer

Dimensionerande grundvattentryck är en term som används inom områden för geoteknik och infrastrukturprojekt. Begreppet används i de sammanhang som en konstruktion eller ett anläggningsarbete behöver dimensioneras baserat på olika laster som behöver kunna hanteras, var av trycket från grundvatten är en betydande parameter. I detta avsnitt beskrivs två modeller för att beräkna det dimensionerande grundvattentrycket. Den första kallas för Chalmersmodell och har utvecklats av Svensson & Sällfors [1985] för att kunna utnyttja korta mätserier av grundvattennivåer. Den andra modellen som behandlas är en typ av extremvärdesanalys, som också utnyttjas i förgående modell. Däremot kan denna även användas som enskild modell för att beräkna dimensionerande grundvattentryck när en mätserie är tillräckligt lång.

2.8.1 Återkomsttid

För att beräkna sannolikheten för överskridelse av en viss grundvattennivå används återkomsttid, vilket är ett vanligt förekommande begrepp inom hydrologin. Detta är ett mått på sannolikheten att en viss händelse kan förekomma och således blir detta ett sätt att uttrycka säkerhet. Hur återkomsttiden väljs beror på konsekvenserna som kan uppstå av att ett värde överskrids och vilka risker som man är villig att ta. Denna bedömning måste göras från fall till fall och måste sammanvägas med kostnader som en högre säkerhetsmarginal kan medföra (SMHI [2021a]).

Exempelvis om ett visst grundvattentryck har en återkomsttid på 100 år kommer detta värde uppnås eller överskridas en gång på 100 år. Alltså är sannolikheten 1% varje enskilt år och vid exponering av denna risk över flera år ackumuleras risken. En konstruktion som har en förväntad livslängd på 100 år kommer att få en ackumulerade risken på 63% för att 100-årsvärdet överskrids någon gång under denna period (ibid.).

Återkomsttiden beräknas oftast statistiskt och från de högsta och lägsta värdena för varje år. Värdena antas vara oberoende av varandra och följa samma sannolikhetsfördelning. Som generell metodik för att beräkna återkomsttiden selekteras lämplig historisk data ut och en empirisk extremvärdesfördelning tas fram för denna mätserie. Urvalet av mättdata görs vanligtvis genom att välja maximi- eller minimivärden över en bestämt tidsperiod eller genom att välja ut värden som överskrider/underskrider en tröskelnivå. De selekterade värdena anpassas sedan till en sannolikhetsfördelning som kan uttrycka återkomsttiden för grundvattennivåer (Haaf [2015]).

2.8.2 Extremvärdesanalys

Extremvärdesanalys är en betydelsefull metod för att uppskatta förekomsten av extrema händelser och hur stor sannolikheten är att dessa infaller. Denna metod har kommit att användas som beslutsfattande grund inom olika samhällsviktiga områden, exempelvis inom vattenkraft för att kunna förutsäga olika flöden, kartläggning av vattenförsörjning eller för att uppskatta risker för översvämningar. Genom att använda statistik som verktyg kan sannolikheten för att ett händelseförlopp inträffar uppskattas genom ett antal grundläggande antaganden och från uppmätt/observerad data (Katz et al. [2002]).

Generellt kan extremvärdesanalys delas in i flera huvudprinciper för att modellera extremvärden. I denna studie kommer *block maxima modellen* att användas eftersom Svensson Sällfors (1985) använder denna metod för att modellera extremvärden. Modellen utgår från att observationer delas in i intervall och det största värdet från varje intervall väljs och skapar en ny serie av de högst observerade värdena från vardera intervall. Perioden kan väljas fritt, men inom hydrologin är ofta detta intervall det hydrologiska året (Katz et al. 2002). Denna period inleds med den period som oftast har låg lagring av vatten i snömagasin, vilket i Sverige har angivits som månadsskiftet september/oktober (SMHI 2021b). Genom att gränsen för intervallen är tydlig blir det även tydligt hur de största värdena selekteras från datamängden. Invändningar mot denna metod är dock att den enbart tar hänsyn till det maximala värdet under ett intervall, utan att ta hänsyn till att andra värden under ett intervall kan överskrida maximinivåerna under andra år. Med grundvattennivåer som utgångspunkt kan detta betyda att maximala nivåer under torra år blir väldigt låga och att inkludera dessa kan få en betydande inverkan på resultatet från extremvärdeanalysen (Madsen et al. 1997).

När en uppskattning av extremvärden ska göras, som dessutom ofta ligger utanför spannet för de observerade värdena, behöver dessa anpassas till en sannolikhetsfördelning. Valet kan baseras på erfarenheter av en viss typ av data, förståelse för mekanismerna bakom som kan påverka datamängden och/eller underökning av observationerna (Loucks & Beek 2017).

2.8.3 Chalmersmodellen

Svensson & Sällfors 1985 utvecklade en modell för att prognostisera dimensionerande grundvattennivåer i syfte att använda vid anläggsarbeten när enbart korta mätserier från en plats finns. I denna studie kommer modellen att benämnas som Chalmersmodellen. Modellen blir främst användbar i projekt för olika typer av anläggningsarbeten som enbart har mätningar av grundvattennivåer på observationsplatsen (platsen där dimensionerande grundvattennivåer ska tas fram) under en kort tid. Metoden utgår från iakttagelsen att närbelägna akviferer samvarierar. Vissa avvikelser i amplituderna och viss tidsförskjutning kan förekomma, men om kraven på tidsupplösningen inte är allt för stor kan denna iakttagelse appliceras. Ytterligare en viktig observation som modellen utgår från är att under kortare tidsperioder är den totala variationsbredden mellan närliggande akviferer proportionella (ibid.).

Modellen använder mätningar av grundvattennivån från ett observationsrör (grundvattenrör vid observationsplatsen) samt mätningar från ett referensrör (grundvattenrör med lång mätserie och känd hydrogeologi). Grundvattennivån vid observationsröret bör enligt modellen mätas minst två gånger i månaden och detta ska göras i minst tre månader. Tillförlitligheten i beräkningarna av dimensionerande grundvattentryck ökar om en längre mätserie från observationsröret används. För längden på mätningarna av grundvattennivåer för referensrör använder ibid. mätserier som är mellan 10-20 år långa. Modellen föreslår att mätningar från referensrör kan tas från grundvattennätet som Sveriges geologiska undersökning (SGU) ansvarar för. Detta är långtgående mätserier som pågått sedan 1960 (ibid.). Det finns ungefär 300 stationer i ett 70-tal olika områden i landet. Vanligtvis görs dessa mätningar två gånger i månaden, men under senare tid har många mätstationer övergått till automatiska mätningar och som har högre mätfrekvens (SGU u.å.[a]).

Valet av referensrör, i förhållande till ett observationsrör, ska enligt denna modell väljas utifrån att dessa bör vara inom ett rimligt avstånd från varandra och vara inom samma klimatzon. Chalmersmodellen anger att ett avstånd inom 50 km i både Stockholmsområdet och Göteborgsområdet är rimligt. De ska även ha likvärdiga hydrogeologiska egenskaper, exempelvis likvärdig akvifertyp (Svensson & Sällfors [1985], [1988]). Högsta dimensionerande grundvattennivån beräknas sedan genom att utgå från mätningar från observationsröret och referensröret enligt följande ekvationer:

$$Y_{O,max,T} = Y_{O,max} + S_R^T \cdot \frac{r_O}{r_R} \quad (4)$$

$Y_{O,max,T}$ = observationsrörets dimensionerande grundvattennivå med återkomsttiden T

$Y_{O,max}$ = observationsrörets maximala nivå under observationstiden $t_0 - t_1$.

r_O = variationsbredden (maxvärdet-minvärdet) i observationspunkten under observationstiden

r_R = variationsbredden (maxvärde-minvärde) i referensröret under observationstiden

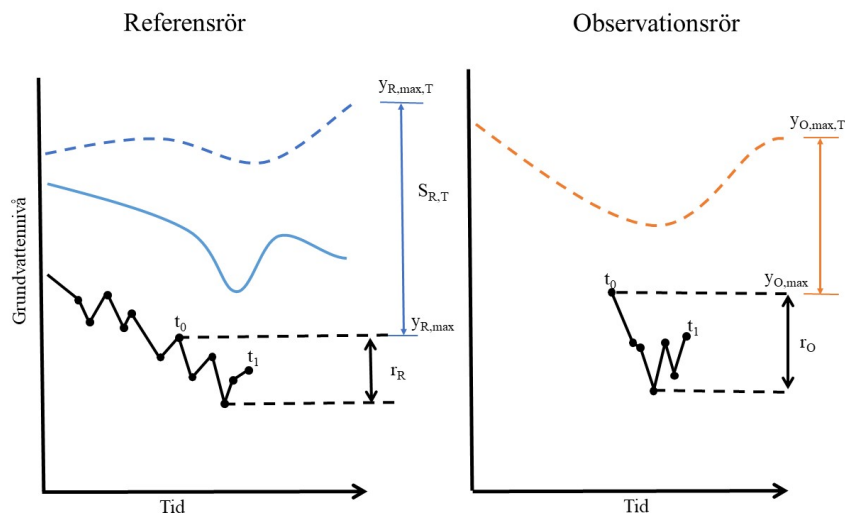
$$S_R^T = |Y_{R,max,T} - Y_{R,max}| \quad (5)$$

S_R^T = differensen mellan det maximala värdet med återkomsttiden T och det högsta uppmätta värdet i referensröret under observationstiden $t_0 - t_1$.

$Y_{R,max,T}$ = maxvärdet för T års återkomsttid för referensröret

$Y_{R,max}$ = referensrörets maximala uppmätta nivå under observationsperioden

Hur $Y_{R,max,T}$ beräknas beskrivs i kommande avsnitt 2.8.4 som beskriver den statistiska bearbetningen av den långa mätserien från referensröret. I figur 6 visualiseras förhållandet mellan grundvattennivåmätningar från referensrör och observationsrör för att beräkna den dimensionerande grundvattennivån.



Figur 6: Beteckningar för ingående variabler i ekvation 4 och ekvation 5 som används för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen (efter Svensson & Sällfors [1985])

Som kontroll för att lämpliga grundvattenrör valts bör variationsbredden från observationsröret under observationstiden undersökas. Den ska inte vara större än 30% av variationsbredden som fås under hela referensrörets livstid. Sedan ska även rådata från observationsbredden enligt metoden vara utförd på samma dag varje månad. Om det skiljer sig mer än 5 dagar från detta mätdatum bör en linjär interpolation utföras för att korrigera detta. Enligt modellen borde detta även göras om det saknas ett mättillfälle (Svensson & Sällfors [1985]).

2.8.4 Statistisk bearbetning av den långa mätserien

För att kunna använda referensrörens långa mätserie krävs statistisk bearbetning av datamängden. Syftet med detta är att få en uppfattning om storleken av de årliga högsta nivåerna och lägsta nivåerna utöver den aktuella tidsperioden som mätningarna har gjorts. Vanligtvis för dimensionerande grundvattennivåer är maximi- eller minimivärdet som är av intresse, men i fortsättningen kommer enbart maximivärden att benämnas. Dock kan samma beräkningar utföras för minimivärden.

I Chalmersmodellen används årliga extremvärden, block maxima, som metod för att selektera extremvärden till extremvärdesanalysen. Detta motiveras av bland annat svårigheterna i att urskilja oberoende värden som inte uppstått från samma hydrologiska händelse (Svensson [1984]). *ibid.* undersöker i sin avhandling olika sannolikhetsfördelningar, så som normalfördelning, Pearson typ III-fördelning, lognormalfördelning, log Pearson III-fördelning och Gumbelfördelning. Genom flertalet beräkningar och testmetoder, exempelvis genom att undersöka skevheten och plottar för approximering till olika fördelningstyper, drogs slutsatsen att man inte kan förkasta antagandet att grundvattennivåernas extremvärden är normalfördelade (*ibid.*). Med detta som grund utgår Chalmersmodellen från denna sannolikhetsfördelning (Svensson & Sällfors [1985]).

Arbetsgången för att bearbeta de observerade värdena görs genom att rangordna referensrörets observerade värden, från högst till lägre maximivärden, genom att välja ut det maximivärde som uppmätts under ett hydrologiskt år. Sorterade värden tilldelas ett nummer (m) baserat på dess rang, 1 motsvarar det lägsta maximivärdet från mätserien. Utifrån de rangordnade värdena kan plottningssannolikheten med Weibulls formel beräknas enligt nedanstående ekvation:

$$P = \frac{N + 1 - m}{N + 1} \quad (6)$$

P = plottningssannolikheten
 N = antalet mätvärden i serien
 m = maximivärdets rang

Med värdet på P från ekvation [6] kan återkomsttiden för specifika maximivärdet fås genom följande ekvation:

$$T = \frac{1}{P} \quad (7)$$

T = återkomsttiden angivet i år

Eftersom observerade maximivärden kan antas vara normalfördelade kan återkomsttid extraheras genom att plotta P för varje rangordnat maximivärde på ett normalfördelningspapper. Från denna graf kan återkomsttiden motsvarande en viss nivå utläsas eftersom en återkomsttid motsvarar en viss sannolikhet att nå upp till denna nivå. I kombination med plotten kan det maximala värdet för en viss återkomsttid beräknas, detta värde sätts sedan in i ekvation 5. Eftersom normalfördelning kan appliceras på serien behöver medelvärdet och standardavvikelsen räknas ut för serien med årliga maximivärden (Svensson & Sällfors 1985). Dessa värden sätts sedan in i följande ekvation för att beräkna extremvärdet med vald återkomsttid:

$$Y_{R,max,T} = \bar{Y}_{max} \pm t_T \cdot s_{max} \quad (8)$$

där

$Y_{R,max,T}$ = maximivärde i referensröret för återkomsttiden T

\bar{Y}_{max} = medelvärdet av N stycken årliga maximivärden

s_{max} = mätseriens standardavvikelse

t_T = frekvensfaktor enligt tabell

Se bilaga A för tabell för värden på frekvensfaktorn t_T för normalfördelning vid olika återkomsttider.

Ekvation för standardavvikelse:

$$s_{max} = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (9)$$

där

s_{max} = standardavvikelsen

X_i = enskilt observationsvärde

\bar{x} = medelvärdet av samtliga observationsvärden

n = antal observationer

2.9 Standarder för geoteknisk dimensionering

Vid anläggningsarbeten av infrastruktur, som vägar, tunnlar och broar, krävs planering för att dessa ska kunna hantera krafter (laster) som konstruktionen kan utsättas för. Dimensionerande grundvattennivåer är således en viktig del i att dimensionera olika typer av konstruktioner. Hur grundvatten ska hanteras behöver därför beskrivas för att harmonisera implementeringen av arbetet för geoteknisk dimensionering och till följd av detta har olika standarder tagits fram.

I detta avsnitt kommer de grundläggande principerna i standarderna Eurokod att beskrivas, med fokus på geoteknisk dimensionering. Den svenska implementeringen i Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner (TK Geo) samt de råd kopplade till kraven i Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktion (TR Geo) kommer också att beskrivas i detta avsnitt.

2.9.1 Eurokoder

En central samling av standarder inom den europeiska unionen är eurokod. Detta är standarder som berör dimensionering av konstruktioner samt ingenjörsmässiga arbetssätt. Eurokod 0 (EN 1990) beskriver grunderna för de regleringar och principer gällande vad en konstruktion ska uppnå med avseende på säkerhet, funktionsduglighet och hållbarhet. Denna standard är menad att användas i kombination med andra standarder som är inriktade mot mer specifika områden ([EN 1990:2002](#) [2005](#)).

Enligt Eurokod 0 ska en konstruktion dimensioneras för att under dess livstid, med en rimlig grad av tillförlitlighet och ekonomiska medel, hantera förväntade laster och uppnå dess specifika funktionalitetskrav ([ibid.](#)). Standarderna är baserade på den så kallade gränstillstånd principen. Vilket är en princip för accepterade gränser med avseende på säkerhet och funktionsduglighet innan fel uppstår. Detta ska försäkra att en konstruktion inte når dess gränstillstånd och inte kan brukas i det syfte konstruktionen är ämnad för (Anwar & Najam [2017](#)). Enligt Eurokod definieras gränsvärdestillstånden baserat på två olika typer av gränstillstånd, brottgränstillstånd och brukgränstillstånd. Brottgränstillstånd berör säkerheten för människor och konstruktionen, detta kan vara exempelvis deformationer, instabilitet, utmattning, förskjutning eller hållfasthet. Brukgränstillstånd berör istället konstruktionens funktionalitet, människors komfort och faktorer som påverkar konstruktionens egenskaper. Detta kan exempelvis vara vibrationer eller brister i konstruktionens hållbarhet ([EN 1990:2002](#) [2005](#)).

2.9.2 Geoteknisk dimensionering inom Eurokod

Standarder som omfattar de geotekniska aspekterna vid dimensionering av konstruktioner anges i Eurokod 7 (EN 1997-1:2004 och EN 1997-2:2007). Mer specifikt behandlas beräkningar för geotekniska laster, vad dessa kan få för effekter på konstruktioner och den geotekniska bärförmågan (Gulvanessian [2005](#)).

I Eurokod anges att grundvattennivåer ska klassas som geometriska data, och där karakteristiska värden för geometriska data antingen ska mätas, vara nominell eller vara uppskattade till en övre eller undre nivå. Grundvattentryck klassas i Eurokod som en last som appliceras på en konstruktion (CEN [2004](#)). Då grundvattentryck behandlas ska detta representera det mest ofördelaktiga värdet som kan uppstå under konstruktionens livstid samt under normala förhållanden ([ibid.](#)). Beroende på detta grundvattentryck tas en säkerhetsfaktor fram i syfte att beakta hur utförliga undersökningar är utförda och hur säkra och reproducerbara dessa metoder är för att ta fram en dimensionerande grundvattennivå (Bergdahl et al. [1993](#)).

Enligt En 1997-2 ska utvärdering av mätningar av grundvattennivåer ta hydrologisk information i åtanke. Detta kan vara längden på mätserier, fluktuationer, förändringar beroende på tid, mätseriens längd och vilken årstid som mätningarna har gjorts. Mätningarna ska även inkludera det lägsta och högsta uppmätta värdet på grundvattennivån för mätperioden. Önskvärt är även att mätningar ska finnas tillgängligt för normala och under extrema förhållanden. Däremot är det sällan som mätningar av grundvatten har utförts under tillräckligt lång tid för att kunna täcka in den hydrologiska informationen som är nödvändig. Istället krävs prognostisering av det förväntade grundvattennivån, eftersom detta är nödvändig information vid dimensionering (CEN [2007](#)).

I en informativ bilaga till EN 1997-2 ges exempel på hur dimensionerande grundvattentryck kan tas fram genom att utnyttja långa tidsserier från liknande akviferer i samma närområde. För att kunna fastställa hur en konstruktion och dess omgivning kan komma att påverkas av förväntade grundvattennivåer kan statistiska metoder användas. Det förslås att långa mätserier kan utnyttjas från ett referensområde för att sättas i relation till det tilltänkta området där mätningar gjorts i minst 3 månader (CEN 2007).

2.9.3 Implementering av geotekniska standarder i Sverige

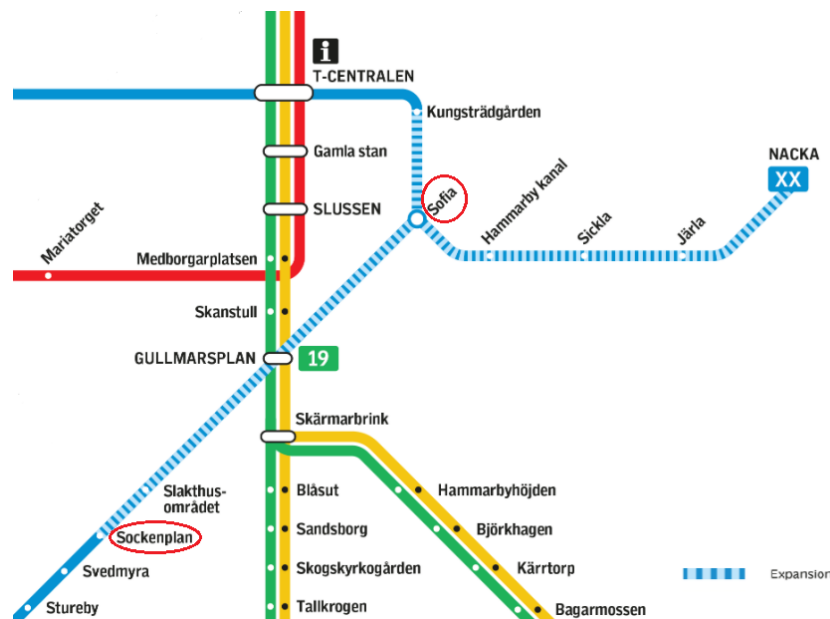
Trafikverket har implementerat ett styrdokument med krav för geotekniska konstruktioner som ska användas då Trafikverket är uppdragsgivare, Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner (TK Geo). Syftet med detta styrdokument är att ge en teknisk beskrivning som anger kraven som gäller för nybyggnation och förbättring av geokonstruktioner. Enligt TK Geo ska geokonstruktioner dimensioneras i enlighet med vedertagna åtgärder, beräkningar, provtagning eller observationsmetoder baserat på Eurokod 7 (Trafikverket 2016a). Trafikverket har även utformat styrdokument med råd för geokonstruktioner, Trafikverkets tekniska råd för geotekniska konstruktioner (TR Geo). TR Geo beskriver olika dimensioneringsmetoder som är accepterade tillämpningar av kraven i TK Geo. Detta dokument beskriver hur laster, exempelvis vattentryck, ska beräknas i enlighet med kraven från TK Geo (ibid.).

Enligt TK Geo ska dimensionerande grundvattennivåer beräknas utifrån de mest ogynnsamma vattennivåerna. Som primär metod för att prognostisera dimensionerande grundvattennivåer ska extermvärdesanalys användas. Om mätningarna som gjorts på observationsplatsen inte har utförts i tillräckligt stor omfattning som krävs för denna metod ska istället dimensionerade grundvattennivåer bestämmas genom att utnyttja närliggande mätstationer av grundvatten, referensrör, eller genom att utgå från topografi och hydrogeologi (ibid.).

Prognostisering av grundvattennivåer ska göras genom att använda referensrör inom samma klimatzon och maximalt vara 50 km från observationspunkten. TR Geo beskriver däremot inte hur långa mäterierna från observationspunkten samt referensröret bör vara. Mot att ett referensrör uppfyller dessa kriterier används samma ekvation som används för Chalmersmetoden för att beräkna dimensionerande grundvattentryck i avsnitt 2.8.3 (Trafikverket 2016b).

3 Fallstudie- utbyggnaden av Stockholms tunnelbana

Stockholm är i en tillväxtfas som inneburit att behovet av nya bostäder ökat kraftigt. I och med detta ökar även behovet av en utveckling av kollektivtrafiken för att klara av belastningen som en befolkningstillväxt innebär. Som ett resultat av detta har det beslutats att en omfattande utbyggnad av Stockholms tunnelbana, både för att utvidga tunnelbanenätet och för att binda samman redan befintliga tunnelbanelinjer. Uppdraget för utbyggnaden kommer att innefatta 18 nya stationer, 3 mil ny tunnelbana och i anslutning till detta uppdraget ska även 130 500 nya bostäder byggas i Stockholms län. Som en del i denna studie kommer dimensionerande grundvattennivåer att beräknas baserat på mätningar av grundvattennivåer vid två av dessa planerade tunnelbanestationer, Station Sofia och Sockenplan. Se stationerna som kommer att användas i denna studie i figur 7.



Figur 7: Spårlinjekarta för utbyggnation av den blå tunnelbanelinjen i Stockholm och med markerade studieområden (Region Stockholm u.å.)

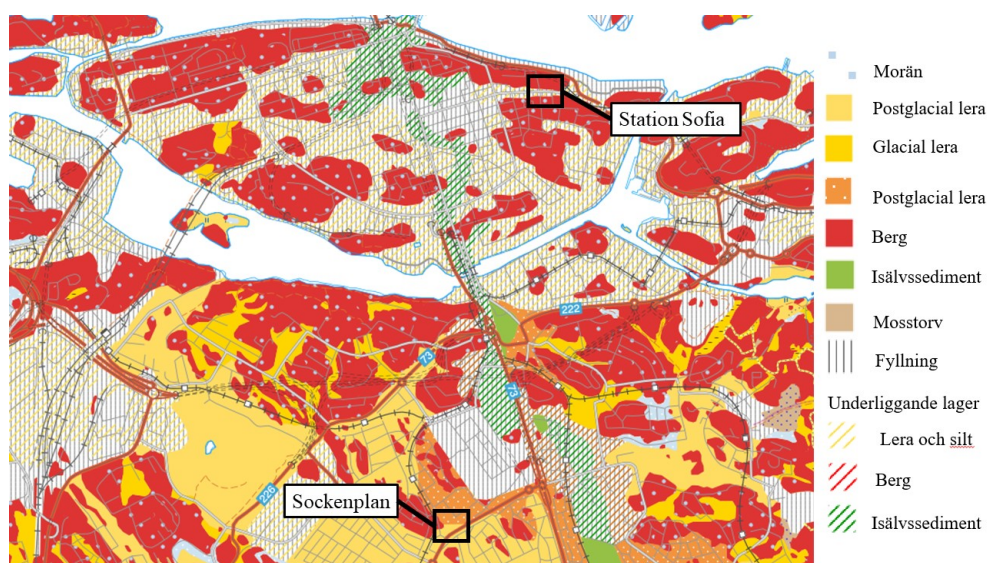
Utbyggnaden kommer att innefatta en ny tunnelbanelinje, gula linjen, som kommer att gå från Arenastaden norr om centrala Stockholm till Söderort. Den redan befintliga blå linjen förlängs både norrut och söderut och förgrenas österut vid station Sofia på Södermalm mot Nacka och även förbindelser till Sockenplan i Söderort, se figur 7. Förgreningarna innefattar totalt 11,5 km spårtunnel, med omväxlande dubbelspårstunnel och två parallella enkelspåriga tunnlar. Intill dessa kommer även arbetstunnlar att gå längs med hela sträckan (Berzell & Dehkordi 2017).

Hela utbyggnaden av tunnelbanan innebär en verksamhet som påverkar grundvattnet under byggnadstiden och även när den är i drift. Fortlöpande mätningar av grundvattennivåer görs för att säkerställa att det inte uppstår skadlig inverkan på omgivningen. Denna studie kommer att utnyttja dessa mätningar genom att beräkna dimensionerande grundvattennivåer för de nya stationerna Station Sofia och Sockenplan. En utvärdering av hydrogeologiska förhållanden kommer att göras genom granskning av dokumentation från platsundersökningar samt genom att utnyttja öppen data som finns tillgänglig via SGU.

3.1 Regionalgeologi i Stockholm

För att få en övergripande förståelse för hur grundvatten bildas, strömmar och lagras vid de områden som kommer att studeras är det av vikt att ha en förståelse för geologin och de processer som format landskapet i stockholmsområdet.

Stockholm är starkt präglad av den senaste istiden och isavsmältningens dynamik vid övergången till ett varmare klimat. Stockholmsområdets landformer, kvartärgeologiska avlagringars förekomster och egenskaper avspeglas till stor del av inlandsisens dynamik, jordarters bildningsmiljö och utvecklingen efter att de glaciala processerna minskat (Wahlgren et al. 2018). Området har dessutom legat under den högsta kustlinjen och har därför påverkats av jordarter som avsatts under Östersjöns olika stadier och även de strand och kustprocesser som format landskapet. Under isavsmältningen var vattennivån ungefär 150 m högre än vad den är idag och vattendjupet i de områden som idag är land var över 100 m. Till följd av att Stockholmsområdet legat under den höga kustlinjen är det även vanligt att yngre jordarter överlagrar tidigare avsatta jordlager. Generell fördelning av jordarter på djupet inom området är att högre höjder främst karakteriseras av avsaknad av jordtäckte och mäktiga avlagringar av havs- och sjösediment förekommer i dalgångar och lägre höjder. Morän är sällsynt vid markytan men är vanligt förekommande på djupet under andra jordlager. Karakteristiskt för Stockholmsområdet är även de åsar med isälvsmaterial går genom landskapet i nord-sydlig riktning (ibid.).



Figur 8: Jordartkarta över Stockholmsåsens passage, de grönmarkerade områdena, genom Södermalm och Söderort. Studieområdena Station Sofia och Sockenplan är markerade ©Sveriges Geologiska Undersökning.

Genom centrala Stockholm passerar Stockholmsåsen som är en 60 km lång ås som sträcker sig från södra Uppland och nordöstra Södermanland. Åsen går genom bland annat Gamla stan, östra delarna av Södermalm och vidare mot Söderort, se figur 8. Åsen har en tydlig åsform då den passerar Gamla stan, däremot när åsen möter en tvärgående förkastningsbrant vid de östra delarna av Södermalm får sand- och grusavlagringarna inte samma nord-sydliga riktning (Berzell & Dehkordi 2017). Se det det randiga området i grönt i figur 8, vilket markerar området med isälvs sediment.

4 Metod

I metod beskrivs hur underlag för resultaten i denna studie tagits fram, vilka beräkningsmetoder som använts och hur resultaten har analyserats. Huvudsyftet är att kunna besvara på frågeställningarna om Chalmersmodellens tillförlitlighet, hur valet av referensrör påverkar Chalmersmodellens resultat och vilken noggrannhet som kan uppnås med denna beräkningsmodell.

Metoden är indelad i sex olika delar; karakterisering av observationsrör, karakterisering av referensrör, bearbetning av datamängder, beräkning av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen, beräkning av dimensionerande grundvattennivåer med extremvärdesanalys och slutligen analys. Noggrannheten kommer att utvärderas genom att jämföra resultaten från Chalmersmodellen med resultaten från extremvärdesanalysen. Extremvärdesanalys antas vara det mest korrekta värdet för dimensionerande grundvattennivåer. Analysen kommer att göras på 8 olika observationsplatser och 15 olika referensrör i Stockholmsområdet.

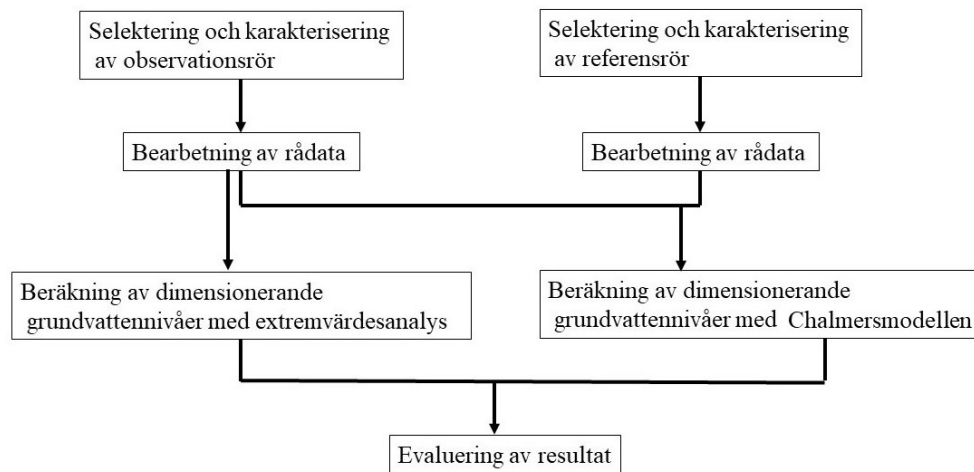
Som en kompletterande del i att undersöka tillförlitligheten av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och för att jämföra mot beräknade värden från studieområdena har selekterade referensrör använts som observationsrör. Detta har gjorts i enlighet med samma arbetsmetod.

4.1 Höjdsystem

Höjder och grundvattennivåer som anges i denna studie är baserat på det nationella höjdsystemet RH 2000 och har enheten meter (m). Detta höjdsystem har den europeiska nollpunkten Normaal Amsterdam Peil (NAP) med referensepok för landhöjningen från år 2000. Vilket är en punkt i Amsterdam som anges som referens för att definiera en nollpunkt vid höjdmätningar. Nivåer och höjder kommer i denna studie att anges som över (+) eller under (-) denna nollpunkt.

4.2 Arbetsgång

Som beskrivet i den inledande delen av metod krävs selektering och bearbetning av grundvattennivåmätningar för att kunna beräkna och granska dimensionerande grundvattennivåer. Arbetsgången i denna studie beskrivs översiktligt i figur 9 och visar den ordningsföljd som de olika stegen i metoden har utförts i.



Figur 9: Ordningsföljden i metoden för att skapa underlag för att kunna beräkna och utvärdera dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys.

4.3 Selektion och karakterisering av observationsrör

Inledningsvis valdes och karakteriserades observationsrör för att användas som underlag för vidare analys genom djupare förståelse för observationsrörens hydrogeologi. Denna kartläggning har gjorts genom att utgå från tidigare gjorda platsundersökningar och jämförelser av jordartskartor från SGU (Berzell & Dehkordi [2017](#); Hägerström [2021](#); SGU [u.å.\[b\]](#); Sweco/Typsa [2020](#)).

Från dessa dokument fås övergripande information om markförhållanden av hela området som påverkas av utbyggnaden av tunnelbanan och mer detaljerad information vid stationsbyggnaderna. En sammanvägning har sedan gjorts för att beskriva övergripande markförhållanden, jordlagerföljd, topografiskt läge och typ av akvifer som observationsrören är placerade vid. Den sammantagna informationen har sedan sammanfattats i en tabell för att användas för vidare analys.

Valen av observationsrör har baserats på att de ska ligga i nära anslutning till de två arbetsområden för utbyggnaden av tunnelbanan. Observationsrören från arbetsområdena har valts utifrån att de ska ha en så lång mätserie som möjligt, med utgångspunkt i att mätningar ska ha utförts i tio år. Detta för att det ska vara möjligt att kunna beräkna det dimensionerande grundvattentrycket med extremvärdesanalys, vilket kräver längre mätserier för att få tillförlitliga resultat.

Antaganden som gjorts är att de dokument som använts beskriver de observationsområdena på ett tillfredsställande sätt och att informationen kan appliceras på närliggande områden som inte direkt beskrivs i detalj. Den informationen om översta jordlager som hämtas från SGU antas även vara gällande. Att ha i åtanke är dock att inga platsundersökningar vid de specifika observationsplatserna har utförts i samband med denna studie, utan slutsatserna om observationsplatserna är baserad på den tillgängliga information från tidigare dokumentation.

4.4 Selektion och karakterisering av referensrör

För att kunna uppskatta den dimensionerade grundvattennivån med Chalmersmodellen behöver den korta mätserien från observationsrören sättas i relation till en lång mätserie från ett referensrör. I denna studie kommer mätningar med långtgående mätningar att tas från datasetet 'Grundvattennivåer tidserier' som redovisar grundvattennivåer och information om de platser som mätningarna görs inom (SGU [u.å.\[a\]](#)). Det finns mätstationer placerade i ett 70-tal olika områden i landet och där en del av dessa mätningar påbörjades i slutet av 1960-talet. Dessa stationer tillhandahålls av SGU och grundvattennivåerna mäts från platser som bedöms vara opåverkade från mänsklig inverkan. Detta betyder att SGU undviker att mäta grundvattennivåer nära berggrum, dräneringar, uttagsbrunnar, reglerade vattendrag eller liknande (SGU [2022](#)). Generellt mäts grundvattennivåerna 1-2 gånger i månaden, men i ett fåtal mätstationer har automatiska mätningar som mäter grundvattennivån med tryckgivare installerats och mätningar görs då varje timme (SGU [u.å.\[a\]](#)).

En successiv sortering av referensrör till denna studie gjordes för att dessa ska vara inom 50 km till observationsplatserna, mätserien ska vara minst 20 år lång och att inga längre uppehåll i mätningarna förekommer. Baserat på att dessa kriterier ska vara uppfylla återstod 15 stycken mätplatser som kan användas i referenssyfte. Var av 12 av dessa ligger på Vaxholm 10-15 km nordöst om centrala Stockholm, två mätplatser i Haninge ungefär 25 km sydöst och en station i Sigtuna 40 km nordväst. Se figur [10](#) för markerade områden där de referensrör som kommer att användas i denna studie är placerade. De referensrör som används och år då mätningarna påbörjades kan ses i bilaga [B](#).



Figur 10: SGU:s grundvattenrör inom Stockholmsområdet. Blå trianglar motsvarar aktiva grundvattenrör som tillhandahålls av SGU. De inringade områdena är de områden som selekterade referensrör befinner sig inom (Sigtuna, Vaxholm och Haninge) och den röda kvadraten markerar ungefärligt område för studieområdena Station Sofia och Sockenplan ©Sveriges Geologiska Undersökning

Underlag om akviferstyp, topografiskt läge och grundvattenförande jordlager fås från information tillhörande respektive dataset. Vidare inhämtas information om översta jordlager från SGU:s kartvisare över jordlager (SGU [u.å.\[c\]](#)). Denna del av metoden grundas på att angiven akvifertyp, topografiskläge, grundvattenförande jordlager och översta jordlager är korrekt karakteriserade.

4.5 Bearbetning och beräkningar

Då observationsrör och referensrör valts och karakteriserats användes mätningarna i syfte att kunna beräkna dimensionerande grundvattennivåer. Beräkningar utfördes både med Chalmersmodellen som beskrivs i sektion [2.8.3](#) och även med extremvärdesanalys som beskrivs i [2.8.2](#). Utvärdering av noggrannheten i beräkningarna från Chalmersmodellen grundas på att resultatet jämförs mot beräknat värde från extremvärdesanalys.

För att möjliggöra denna jämförelse krävs bearbetning av samtliga datamängder för att anpassas till beräkningsmodellerna. Eftersom stora datamängder använts har datahantering och beräkningar huvudsakligen utförts med hjälp av Python. Vilket har gjorts genom att utforma script som sorterar ut mätningar baserat tidsintervall och bearbetade dataset har sedan beräknats i enlighet med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys.

Utvärdering av Chalmersmodellen utgår från att mätningar finns tillgängliga och att dessa är möjliga att använda vid beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer. Däremot är det viktigt att ha i åtanke att grundvattennivåmätningar som använts för Chalmersmodellen och extremvärdesanalys ibland uteblir eller inte uppfyller kvalitetskraven. Denna studie ämnar att undersöka Chalmersmodellen i form av en fallstudie och många potentiella faktorer kan påverka mätningarna och därmed dess kvalitet. Exempelvis mätningar som inte sammanfaller med specifika datum, varierande mätfrekvenser eller att mätningar uteblir. I denna studie har mätningarna anpassats för att överensstämna med den typen av data som Chalmersmodellen beskriver i den mån detta har varit möjligt. Ytterligare antaganden i denna del av metoden är att extremvärdesanalys betraktas som det mest exakta värdet.

4.5.1 Bearbetning och beräkningar med Chalmersmodellen

Inledningsvis har mätningar från observationsrören bearbetats enligt ett tidsintervall som motsvarar 12 mätningar för vardera observationsrör, detta ska representera ett tidsintervall på 6 månader om två mätningar i månaden utförts. Däremot har det generellt utförts en mätning per månad och därför har ett år av mätningar valts för att motsvara 12 mätningar. Mätningarna har anpassats till att ha samma datum som den långa mätserien från referensrör som används. Detta gjordes genom linjär interpolation om datumen skiljer sig mer än 5 dagar från den 1:a och 15:e varje månad. Tidsintervallen mellan respektive observationsrör skiljer sig något åt då perioder med hög kontinuitet i mätningarna har valts, se tabell [1](#).

Tabell 1: Ungefärliga mätfrekvenser och intervall på de observationsrör med nivåmätningar av grundvatten som används för Station Sofia och Sockenplan. Namnen på observationsrören är de fetmarkerade kombinationerna av siffror och bokstäver

Station Sofia	T67C92U	13CW403U	TGW1101	T667D781U
Mätfrekvens	1-2/mån	1-3/mån	1/mån	1/mån
Tidintervall	2016/10- 2017/10	2019/09- 2020/09	2016/9- 2017/9	2016/10 2017/10
Sockenplan	15X027	106B177	106B188	106B206
Mätfrekvens	1/mån	1/mån	1/mån	1/mån
Tidintervall	2018/09- 2019/09	2017/10- 2018/10	2019/10- 2020/10	2019/10 2020/10

Från valda mätperioder har sedan det maximala värdet som uppmäts under denna period och variationsbredden tagits fram. Samma tidsintervall har sedan applicerats på referensrörens mätserier, vilket använts för att beräkna variationsbredden inom samma tidsintervall som observationsrörens mätperiod.

Den långa mätserien från referensrören som används inom Chalmersmodellen har också bearbetats i enlighet med kriterier angivna i beskrivningen av Chalmersmodellen (Svensson & Sällfors 1985). Detta betyder att den 1:a och 15:e varje månad valts, har dessa värden inte funnits inom ± 5 dagar har linjär interpolation mellan närmsta mätvärden gjorts. Om mätningar uteblivit i mer än 90 dagar har ingen interpolation gjorts.

Referensrörens långa mätserie används för att både beräkna standardavvikelse och värdet för en viss återkomsttid, vilket beskrivs i avsnitt 2.8.4. Referensrörens mätperioder har inte justerats efter något specifikt tidsintervall utan använts i dess helhet från och med att mätningarna började för ett specifikt observationsrör.

Beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen gjordes genom att utgå från ekvation 4 i avsnitt 2.8.3. Till ekvation 4 används beräknade värden från ekvationerna 5 och även ekvationerna 8 och 9 i avsnittet 2.8.4 för den statistiska bearbetningen av de långa mätserierna från referensrören.

4.5.2 Bearbetning och beräkningar med extremvärdesanalys

Som tidigare nämnts kommer noggrannheten av resultaten från Chalmersmodellen att sättas i relation mot dimensionerande grundvattennivåer som har beräknats genom extremvärdesanalys. Det innebär i detta fall att hela mätserien kommer att användas och inte begränsas till 12 mätningar, som för Chalmersmodellen. Grunderna för extremvärdesanalys beskrivs i avsnitt 2.8.2, där platsspecifika data från observationsrören kommer att användas för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med extremvärdesanalys.

Med utgångspunkt från ett svenskt perspektiv vid hantering av dimensionerande grundvattentryck anger bland annat TK Geo att extremvärdesanalys bör användas för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer om mätserien är tillräckligt lång (Trafikverket 2016a). Hur denna extremvärdesanalys bör genomföras och vilka antaganden som ska ligga till grund anges däremot inte.

Gällande längd på mätserie har denna studie valt att utgå från mätserier som utförts i 10 år i den mån detta har varit möjligt. Se tabell 2 för längd på mätningarna från respektive observationsrör och perioder då uppehåll i mätningarna förekommer.

Tabell 2: Ungefärliga mätfrekvenser och intervall på de nivåmätningar av grundvatten som används från observationsrör vid Station Sofia och Sockenplan

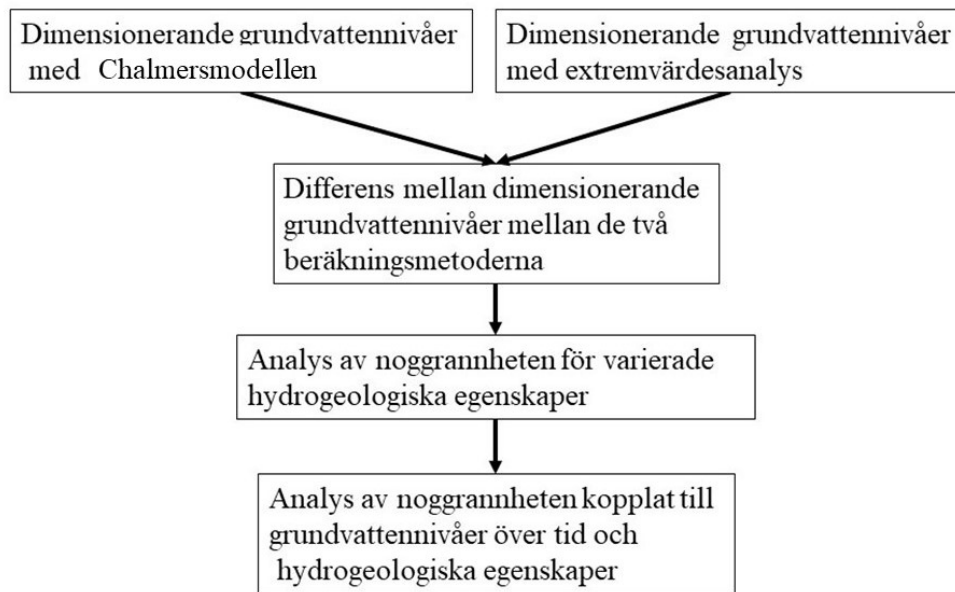
Station Sofia	T67C92U	13CW403U	TGW1101	T667D781U
Mätfrekvens	1-2/mån	1-3/mån	1/mån	1/mån
Tidsintervall	2013/09- 2020/12	2013/09- 2020/09	2011/7- 2019/12	2004/02- 2020/12
Kommentar			ej mätning 2012-2015	ej mätning 2012-2015
Sockenplan	15X027	106B177	106B188	106B206
Mätfrekvens	1/mån	1/mån	1/mån	1/mån
Tidsintervall extremvärdesanalys	2016/07- 2021/02	1956/04- 2021/02	1978/02- 2021/11	1982/02- 2021/11
Kommentar		ej mätning 1983-2015	ej mätning 1983-2015	ej mätning 2003-2015

För extremvärdesanalys har ingen bearbetning av mätningarna gjorts för att anpassa mätningarna till specifika datum. Mätningarna har däremot justerats för att innehålla ungefär samma antal mätningar varje månad. Den främsta sorteringen har gjorts då många mätningar utförts under en månad, vilket då har sorterats bort för att mätserierna ska vara mer likartade i dess mätfrekvens. År med få mätningar har även sorterats bort eftersom dessa inte anses vara representativa. Slutligen har tydligt avvikande värden som är betydligt mycket högre eller lägre än resterande uppmätta nivåer tagits bort från datasetet.

Beräkningarna av dimensionerande grundvattennivåer gjordes genom att använda ekvationerna 8 och 9. Detta är i enlighet med samma metod som används vid den statistiska bearbetningen som görs för Chalmersmodellen, men applicerat på hela mätserien för observationsrören.

4.6 Evaluering av dimensionerande grundvattennivåer

Då dimensionerande grundvattentryck beräknats både med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys behöver dessa resultat analyseras för att kunna svara på vilken noggrannhet som kan uppnås och hur valet av referensrör påverkar tillförlitligheten. Från metodens inledande del där observationsrör och referensrör karakteriserades och dess områdesförhållanden har beskrivits har platsernas egenskaper sammanfattats till att främst analyseras utifrån vilken akvifertyp och vilket topografiskt läge som observationsrör och respektive referensrör är placerade vid, benämns hydrogeologiska egenskaper. Med typ av akvifer menas om det är en öppen eller sluten akvifer och topografiskt läge menas om det är ett inströmnings-, intermediärt- eller utströmningsområde. Analys av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys kommer översiktligt att göras enligt flödesschemat i figur 11.



Figur 11: Arbetsgång för analys av noggrannheten och tillförlitligheten av dimensionerande grundvattennivåer som beräknats med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys

Noggrannheten i prognostiseringen av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen görs genom att subtrahera motsvarande dimensionerande grundvattennivå som beräknats med extremvärdesanalys. Som tidigare nämnt antas värdet som beräknas med extremvärdesanalys vara det mest exakta värdet. Detta eftersom denna metod utgår från långa mätningar för det specifika observationsröret, jämfört mot Chalmersmodellen som också utgår från mätningar från en referensplats. En ökad noggrannhet antas därför om dessa två värden är likvärdiga och differensen mellan dessa går mot noll.

För att undersöka hur de hydrologiska egenskaperna påverkar tillförlitligheten testas olika kombinationer av observationsrör mot referensrör. För att undersöka hur dessa påverkar tillförlitligheten undersöktes spridningen av differensen, detta redovisades sedan i boxplottar.

Mer djupgående analys gjordes sedan av fem stycken observationsrör som valdes för att ha olika hydrogeologiska egenskaper. Dessa har sedan jämförts mot observationsrör och referensrör med varierade hydrogeologiska egenskaper. Detta har gjorts genom att grundvattennivåer har analyseras utifrån hur observationsrörens och referensrörens nivåer samvarierar över tid, samt grundvattennivåernas amplituder. Sammanfaller nivåvariationerna i tid, de har likartad amplitud samt likartade hydrogeologiska egenskaper tolkas detta som att observationsröret och referensrör bör vara lämpade att använda för att prognostisera dimensionerande grundvattennivåer.

4.7 Jämförelse med referensrör som observationsrör

I inledande delen av metod nämns att beräkningar kommer att göras genom att använda referensrör som observationsrör. Detta innebär att utvalda referensrör har använts som observationsrören i tidigare del av denna studie och i enlighet med kriterier angivna i Chalmersmodellen för observationsrör (Svensson & Sällfors 1985). Syftet med detta är att modellen även appliceras på områden där ingående data är av hög kvalitet, lika förhållanden mellan mätpunkterna samt att dessa är nära varandra geografiskt. På detta sätt kan jämförelser av hur beräknade värden av dimensionerande grundvattennivåer från ideala fall skiljer sig från fallstudien.

Arbetsgången med att bearbeta datamängderna och beräkningsmetod har utförts på samma sätt som beskrivet i tidigare del av metod, i enlighet med arbetsgången som visualiseras i figur 9.

Selekteringen av referensrör som används som observationsrör har baserad på akvifertyp och topografiskt läge. Olika egenskaper har valts för att inkludera olika typer av hydrogeologiska egenskaper. Exempelvis att observationsrören har akviferer med slutna förhållanden som ligger inom inströmningsområde eller intermediärt område. Selektion har även gjorts för att motsvara de typer av akviferer och topografi för observationsrören som har använts i fallstudien. De valda referensrören som används som observationsrör och motsvarande referensrör kan ses i tabell 3.

Tabell 3: Selektade referensrör som används som observationsrör för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys.

Observationsrör	Akvifertyp	Topografiskt läge
55_7	sluten	intermediär
55_11	sluten	utströmning
21_2	öppen	inströmning
56_3	öppen	intermediär

De referensrör som har använts för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys med de utvalda referensrören som används som observationsrör redovisas i tabell 4.

Tabell 4: Referensrör med varierade akvifertyper och topografiskt läge som använts för beräkningarna av dimensionerande grundvattennivåer då referensrör används som observationsrör.

Referensrör	Akvifertyp	Topografiskt läge
55_9	sluten	inströmning
55_5	sluten	intermediär
55_14	sluten	utströmning
55_24	öppen	inströmning
56_3	öppen	intermediär
21_2	öppen	intermediär

4.8 Analys av normalfördelning

Baserat på att Svensson 1984 visat på att normalfördelning kan nyttjas för att beskriva fördelningen av extremvärden av grundvattennivåer grundas beräkningarna i Chalmersmodellen på detta. För att undersöka om mätvärden kan beskrivas av normalfördelning görs normalsannolikhetsdiagram (*normal probability plot*) för referensrörens årliga maximum grundvattennivå. Detta görs även för mätvärdena från observationsrören som används vid beräkningar av dimensionerande grundvattennivå med extremvärdesanalys. Dessa grafer redovisas i bilaga E för referensrören och bilaga C för observationsrören.

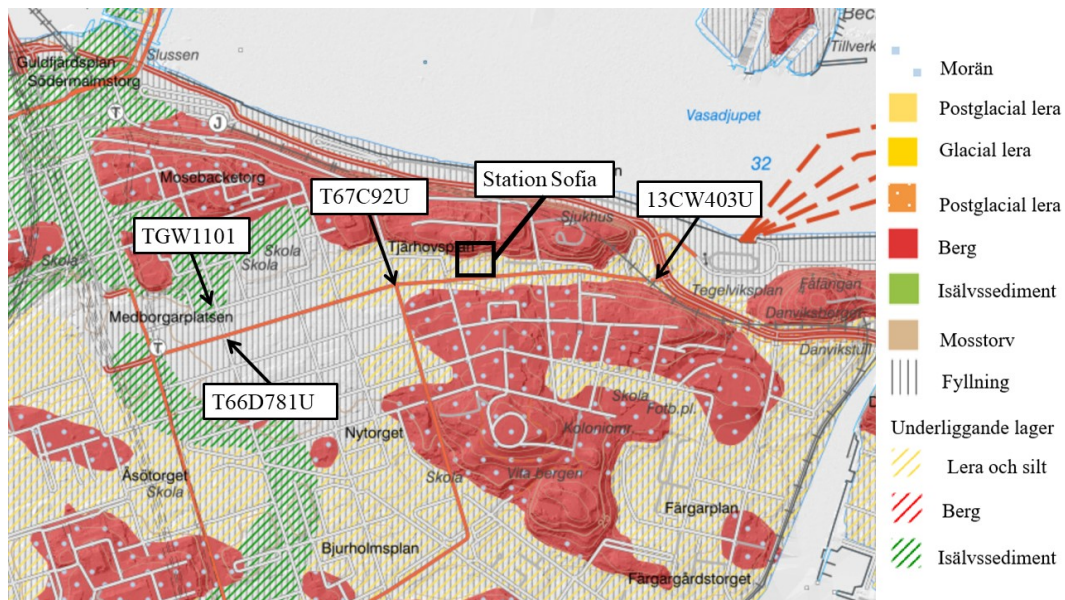
Dessa grafer tas fram genom att använda MATLAB och analysen grundas på att kvantilerna från mätdatan sätts mot kvantilerna för en normalfördelning. Den sorterade provdatan plottas längsmed x-axeln och y-axeln som representerar normalfördelningens kvantiler som omvandlas till sannolikhetsvärde. Avläsning av graferna görs genom att grafens heldragna linje motsvarar en anpassad linje efter normalfördelningen, detta betyder att om normalfördelning kan användas för mätdatan bör mätpunkterna följa linjen. Detta innebär att med större avstånd till denna linje indikeras avvikelser från normalfördelningen (MATLAB u.å.). Detta används för vidare analys av mätdatans kvalitet och diskussion angående antagandet att normalfördelning kan appliceras på grundvattennivåer.

5 Studieområde Station Sofia

I detta avsnitt undersöks hydrogeologiska förhållanden vid Station Sofia. Information inhämtas från tekniska beskrivningar som har gjorts av platsen för stationsbygget och ett hydrogeologiskt PM som tagits fram i anslutning till miljöprövning för tunnelbanan (Berzell & Dehkordi 2017; Westdahl 2019). Även kartor från SGU kommer att användas för att beskriva geologiska och hydrologiska förhållanden vid observationsrören (SGU u.å. [b]). Inom detta studieområde kommer observationsrören T67C92U, T66D81U, 13CW403U och TGW1101 att beskrivas.

5.1 Översiktlig beskrivning av arbetsområdet för Station Sofia

Station Sofia planeras att byggas på Södermalm i Stockholm och är en del av förlängningen av den blå linjen från den befintliga stationen Kungsträdgården i centrala Stockholm. Stationsbyggnaden och de observationsrör som används är placerade på Södermalms östra del, se figur 12.



Figur 12: Översiktlig jordartskarta över Station Sofia och vart i förhållande till stationsbygget som observationsrören är placerade ©Sveriges Geologiska Undersökning

Biljetthallen byggs på marknivå och hissar används för att transportera resenärer till perrongen. Djupet på perrongen antas bli ungefär 100 m under befintlig markyta (Westdahl 2019). Under Folkungagatan, som passerar parkens södra del, har arbetet redan påbörjats med att driva en arbetstunnel österifrån i riktning mot stationen. Detta innebär en verksamhet som påverkar grundvattennivåerna kring området för tunneldrivningen. Genom det fortlöpande arbetet kommer fler områden att påverkas av arbetet med tunneln, vilket i sin tur innebär att grundvattennivåerna kring Station Sofia blir mer störda.

Som nämnts i avsnitt 3.1 passerar Stockholmsåsen genom centrala delar av Stockholm och passerar även östra delarna av Södermalm. Åsmaterial förekommer därför inom studieområdet. I närområdet till Station Sofia finns ett undre grundvattenmagasin med grundvattenbildning i det område som Stockholmsåsen passerar. Grundvattnet har som övergripande strömningsriktning åt öst och med viss utströmning i sydöstlig riktning (Berzell & Dehkordi 2017).

Samtliga observationsrör ligger vid eller i nära anslutning till en gata som heter Folkungagatan. I figur 12 är detta den rödmarkerade gata som går i väst-östlig riktning, förbi Station Sofia. Folkungagatan ligger mellan två sluttade berg som skapar en nedsänkning i terrängen längst med gatan, som är fyllt med ett mäktigare jordlager. Längs med Folkungagatan går det även en svaghetszon i berget, som innebär en högre sprickighet och att berget har lägre kvalitet (ibid.).

5.2 Platsbeskrivning av observationsrör T67C92U

Observationsrör T67C92U ligger 170 m väster om stationsbyggnaden längst med Folkungagatan, se figur 12. Markytan har en nivå som är +25,7 m och är fallande i östlig riktning, (ibid.). Från sonderingar som gjorts längst med Folkungagatan, som ligger i samma svacka som observationsröret, utgörs det översta jordlagret av fyllnad med en mäktighet på ungefär 1 m. Lagret övergår till ett lerlager som är mellan 2 m. Jordlagret övergår därefter till sandjord med en mäktighet på 8 m och därefter ungefär 5 m morän närmast bergets överyta. Observationsröret har ett djup som är 12 m och genom att utgå från jordlagerföljden från närliggande sonderingar bedöms röret ligga i morän. Grundvattnets medelnivå för detta observationsrör är ungefär +16,7 m och jämförs detta mot marknivån betyder detta att grundvattennivån är i medel 9 m under markytan. Baserat på lerlagrets mäktighet betyder detta att grundvattennivån inte går upp till lerans underkant, utan ligger troligen i det sandiga jordlagret. Det råder därmed inte helt slutna förhållanden vid detta observationsrör, jämfört mot om grundvattennivån hade gått upp till lerans underkant. Rörets topografiska läge är dessutom troligen ett intermediärt område då inströmningsområdet ligger väster om röret placering och utströmningsområdet sker öster om rörets placering (ibid.).

5.3 Platsbeskrivning observationsrör T66D781U

Detta observationsrör ligger längst med Folkungagatan ungefär 500 m från arbetsområdet för stationsbyggnaden, se figur 12. Röret är beläget på en trottoar och närområdet består av hårdgjorda ytor. Marknivån vid detta observationrör är +25,4 m. Det översta jordlagret är enligt SGU fyllnadsjord (SGU u.å.[b]). Under detta lager antas det förekomma skiktade jordlager med sand och grus. Observationsröret befinner sig i nära anslutning till Stockholmsåsens passage genom östra Södermalm. Från närliggande sonderingar, som gjorts ungefär 50 m från observationsröret, utgörs det översta jordlagret av fyllnadsjord som är ungefär 1-3 m. Observationsröret är placerat inom ett område som saknar eller utgörs av ett tunnare lerlager och sedan sandjord till bergets överkant. Observationsrörets djup är 11,7 m och grundvattennivån vid observationsplatsen har ett medelvärde på ungefär +15,7 m. Detta betyder att grundvattennivån ligger ungefär 9,7 m under markytan (Berzell & Dehkordi 2017).

Baserat på tillgänglig information bedöms detta observationsrör vara placerat i sandjord. Det antas inte vara några slutna förhållanden eftersom det antingen inte förekommer något lerlager eller ett tunnare lerlager, till vilket grundvattennivån inte går upp till. Enligt Berzell & Dahkordi (2017), ligger detta observationsrör inom ett grundvattenbildande område och i utkanten av ett undre grundvattenmagasin. Med detta som grund bedöms detta vara en öppen akvifer där observationsröret är placerat vid ett inströmningsområde.

5.4 Platsbeskrivning av observationsrör 13CW403U

Observationsrör 13CW403U ligger inom ett arbetsområde vid öppningen till arbetstunneln som går mot station Sofia. Marken vid observationsröret är asfalterad och intill detta arbetsområde går en bilväg och nordöst ligger en kaj som vetter mot Saltsjön. I nordvästlig riktning ligger varvsbranten, vilket har en brant lutning ner mot observationsröret. Markytan är sedan fortsatt avtagande i sydöstlig riktning. Observationsplatsen ligger också vid samma svaghetszonen som går längs med Folkungagatan.

Tillrinning av grundvatten sker från Folkungagatan i riktning mot kajen, där grundvattennivån följer den fallande terrängytan (Berzell & Dehkordi 2017). Observationsröret ligger inom ett område med postglacial lera och silt enligt SGU's kartvisare (SGU u.å.[b]). För denna plats har ingen sondering av jordlagerföljderna gjorts. Däremot genom att utgå från att observationsplatsen ligger inom ett område med lägre höjdnivåer bör mäktigare avlagringar av finkorniga havs- och sjösediment förekomma. En trolig lagerföljd bör vara ett övre lager med postglacial lera, i enlighet med SGU's kartvisare, sedan glacial lera som överlagrar ett lager av morän som är avsatt mot bergövertytan.

Markytan vid observationsröret är +5,5 m och röret går ner till 4,3 m under markytan. Medelgrundvattennivån är +0,5 m och detta innebär att grundvattennivån ligger ungefär 5 m under markytan. Eftersom att det översta lerlagret troligen har en högre mäktighet och grundvattennivån är relativt nära markytan bör slutna förhållanden råda. Baserat på observationsrörets topografiska läge skulle detta kunna vara ett utströmningsområde.

5.5 Platsbeskrivning av observationsrör TGW1101

Observationsrör TGW1101 ligger ungefär 500 m väster om stationsbyggnaden och är placerad vid en asfalterad parkering och resterande närområde är bebyggelse. Observationsröret ligger även inom ett relativt flackt område (Berzell & Dehkordi 2017).

Stockholmsåsen passerar observationsröret och enligt PM för geohydrologi är detta ett område med växellagrad sand (Berzell & Dehkordi 2017; SGU u.å.[b]). I nära anslutning till röret passerar även svaghetszonen som går längsmed Folkungagatan (Hägerström 2021). Sondering nära observationsröret har gjorts längst med samma gata som observationsplatsen som går parallellt längst med Folkungagatan. I och med att dessa ligger i samma läge i förhållande från Folkungagatan antas likartade jordlagerföljder. Utifrån denna bedöms det förekomma ungefär 3 m fyllnadsjord och därefter sandjord ner till bergets överkant. Markytan vid observationsplatsen är +26,4 m vid observationsröret och rörets underkant ligger på 14 m under markytan. Grundvattennivån har en genomsnittlig nivå som är +15,8 m, vilket innebär att nivån är ungefär 10,6 m under markytan

och bör ligga i sandjord. Det bedöms därför vara en öppen akvifer. Röret ligger även vid utkanten av ett undre magasin inom området för grundvattenbildning och dess topografiska läge bör därför vara inom ett inströmningsområde.

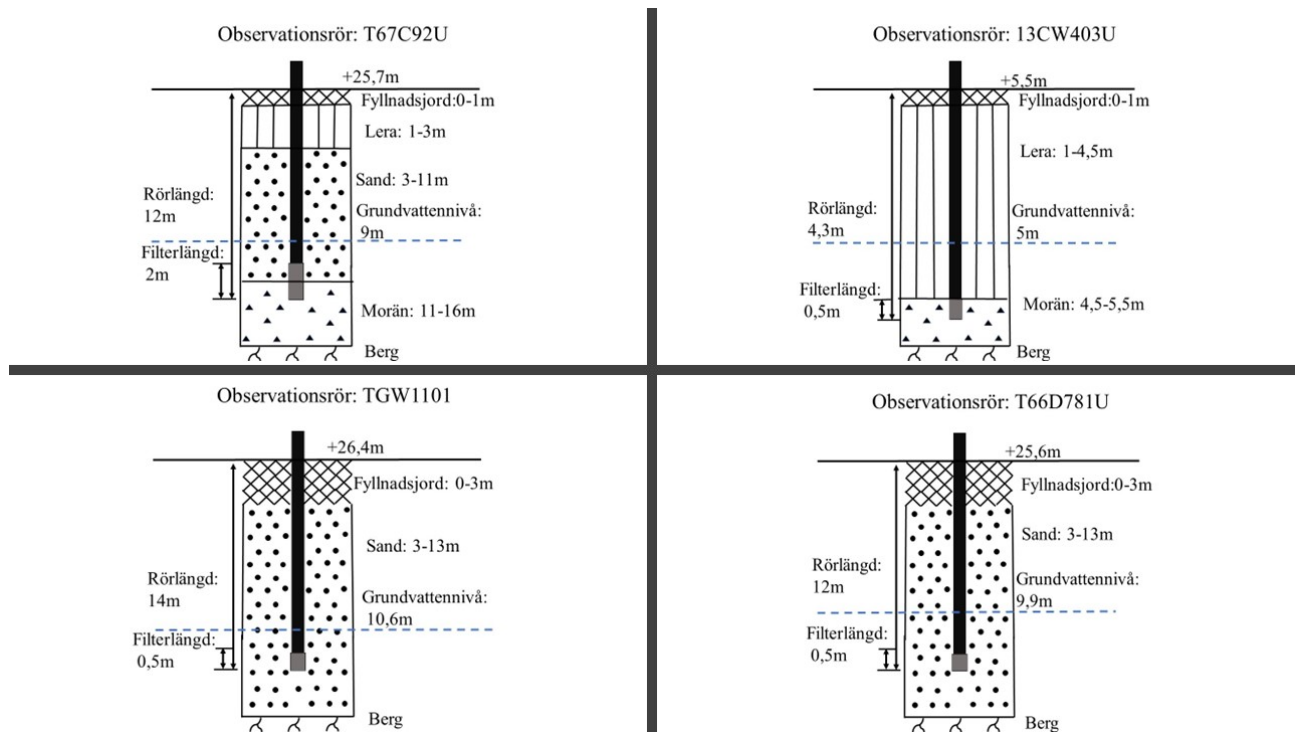
5.6 Sammanfattande hydrogeologiska egenskaper vid Station Soifia

Från områdesbeskrivningarna för respektive observationsrör i avsnitt 5.1 till 5.5 sammanfattas egenskaper för observationsrören baserat på markyta, medelgrundvattennivå, observationsrörets djup, jordlagerföljd, akvifertyp och topografiskt läge. Det råder varierade förhållanden vid dessa platser och de översiktliga egenskaperna för dessa ses i tabell 5. De observationsrör som benämns ligga vid en akvifer som är öppen/undre är de platser där det troligen förekommer ett lager med lera, men att grundvattennivån inte når upp till dess underkant. Vilket innebär att det inte råder slutna förhållanden vid akviferen.

Tabell 5: Sammanfattade egenskaper och förhållanden för observationsrören i anslutning till Station Sofia. Akviferer som benämns som öppen/undre är akviferer som inte har helt slutna förhållanden, trots troligt överlagrande lera. Då enbart [m] anges som enhet är detta angivet enligt referenssystemet RH2000.

Rör/Faktorer	T67C92U	13CW403U	TGW1101	T667D781U
Ytbeskaffenhet	asfalterad	asfalterad	asfalterad	asfalterad
Markyta [m]	+25,73	+5,51	+26,35	+25,42
Grv. nivå [m]	+16,7	+0,5	+15,8	+15,7
Rördjup [m under markytan]	12	9,58	14	11,66
Översta jordlager	postglacial lera	postglacial lera	sandjord	postglacial lera/ sandjord
Jordart akvifer	morän/ sandjord	morän	sandjord	sandjord
Akviferstyp	öppen/undre	sluten	Öppen	öppen/undre
Topografiskt läge	intermediär	utströmning	inströmning	inströmning

Som en del i att sammanställa observationsrören har även illustrationer för vardera observationsplats som en del i att bedöma de hydrogeologiska förhållandena gjorts, se figur 13. Detta har utförts genom att sätta medelgrundvattennivån och rörets djup i förhållande till antagna jordlagerföljden och dess mäktighet.

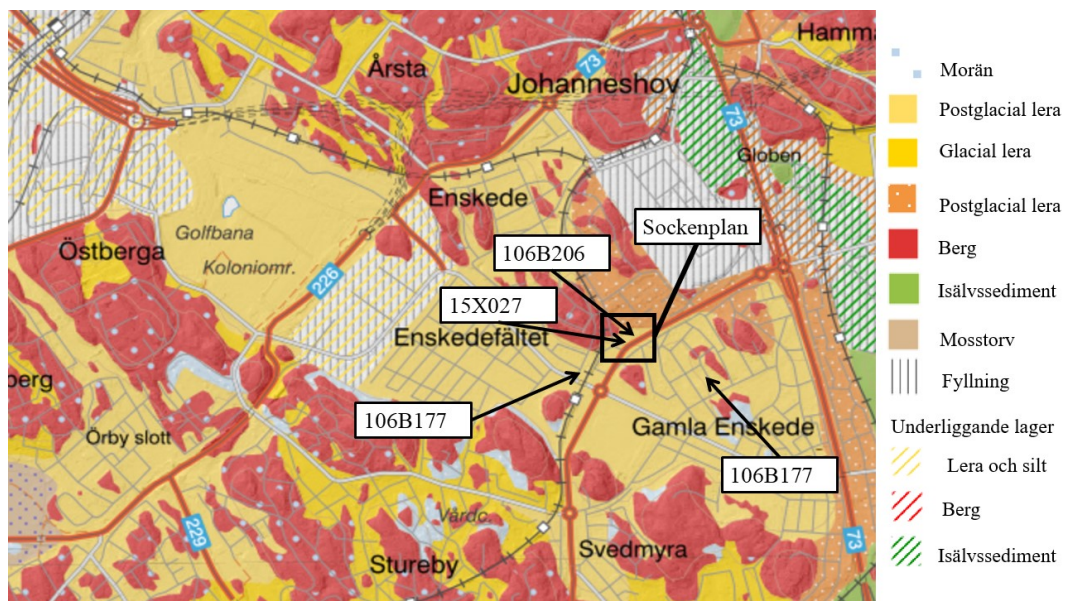


Figur 13: Angivna värden på marknivå, medelgrundvattennivå, rörlängd, jordartsföljd och jordlagrens mäktighet för observationsrören för studieområdet Station Sofia.

6 Studieområde Sockenplan

I detta avsnitt beskrivs observationsrören för byggnadsarbetet vid Sockenplan. Analysen utgår från omgivningsförhållanden som anges i en teknisk beskrivning av arbetsområdet för Sockenplan samt ett PM om hydrogeologi som skrivits i samband med miljöprövningen för tunnelbanan (Berzell & Dehkordi [2017](#); Sweco/Typsa [2020](#)). Även kartvisare från SGU användas (SGU [u.å.\[b\]](#)).

Sockenplan ligger i Stockholms söderort och sammanlänkar de nya tunnelbanestationerna med den befintliga blå linjen, se figur [7](#). Inom arbetsområdet ska schakt i berg och jord göras för en så kallad cut-and-cover-tunnel. Detta är en metod för att bygga tunnlar genom att sektionen för tunneln schacktas bort och täcks av en stödkonstruktion som är tillräckligt stark för att klara av laster som kommer att byggas ovanpå (Ramboll [u.å.](#)).



Figur 14: Översiktlig jordartskarta över Sockenplan och placering av observationsrören i förhållande till stationsbyggnaden ©Sveriges Geologiska Undersökning

Stockholmsåsen passerar ungefär 1 km väster om Sockenplan, i nord-sydlig riktning. Markprofilen vid Sockenplan tillhör ett stort lerområde och i nordlig och sydlig riktning begränsas det av fastmark och lerområdet fortsätter sedan västerut, se figur [14](#). Grundvattenbildningen inom avrinningsområdet som Sockenplan tillhör är främst inom dess norra del och utströmning sker inom dess södra del (Berzell & Dehkordi [2017](#)).

Två observationsrör som använd i denna studie är placerade inom arbetsområdet för Sockenplan och ytterligare två observationsrör är placerade i nära anslutning till området, se figur [14](#). Grundvattenrören 106B206 och 15X27 är placerade inom arbetsområdet och beskrivs i samma avsnitt och de två observationsrören som ligger utanför beskrivs i avsnitt [6.3](#) samt avsnitt [6.2](#).

6.1 Platsbeskrivning av observationsrör 106B206 och 15X027

Innan anläggningsarbetet påbörjades var rör 106B206 placerat på en gräsyta, vid en intilliggande bilväg och grusplan. Rör 15X27 är placerat 100 m från rör 106B206 på samma gräsyta. Närliggande bebyggelse består av lokalen för Enskede gårds gymnasium och bostadsområden med villor som är 1-2 plan. Inom arbetsområdet ligger gymnasiet på en högre höjd med en fallande gradient från norr till söder (Sweco/Typsa 2020). Schaktområdet delas av en bergsrygg i norr, som till viss del går i dagen och sträcker sig från Palmefeldsvägen med fallande lutning förbi Enskedevägen. Precis intill Enskede gårds gymnasium finns ett slag i berget (sprickbildningar) med ett djup på 11 meter. Detta slag kallas inom detta projekt för yxhugget och bergets sluttning är mycket brant, med en lutning som är ungefär 1:1 till nästan vertikalt. Jorddjupet ändras vid detta slag från ungefär 2-4 m till 10-15 m. Slaget fortsätter även i sydlig riktning och vid Enskedevägen intill arbetsområdet är denna svacka ca 10 m (ibid.).

Grundvattnet följer topografin och strömningsriktningen inom arbetsområdet bedöms ha en sydvästlig riktning. Nedströms om arbetsområdet kan grundvattnet även strömma i sydlig riktning och gradienten blir något flackare (ibid.).

Från den tekniska beskrivningen av Sockenplans utgörs arbetsområdet generellt av ett översta fyllnadslager, lera, friktionsjord och berg. Leran är varvig och har inslag av sand- och siltskikt. Friktionsjorden är material från Stockholmsåsen bestående av växellagrad sand och grus samt ställvis kan det förekomma svallsand. Inom arbetsområdet bedöms jordlagret närmast bergytan vara morän (ibid.).

För observationsrör 15X027 har markundersökningar gjorts ungefär 10 m ifrån observationsröret. Denna tyder på att jordlagret består av ungefär 1 m fyllnadslager, ett 5 m mäktigt lerlager och därefter ungefär 0,5-1 m lager friktionsjord mot bergets överyta. Marknivån vid detta observationsrör är +23,3 m och grundvattennivån är i medel +20,4 m. Vilket betyder att grundvattennivån ligger ungefär 3 m under markytan. Rördjupet är 7 m och bör vara placerad i friktionsjorden. Baserat på att (ibid.) bedömer att det understa jordlagret är morän antas detta även gälla för observationsrör 15X027. I och med att det förekommer ett lerlager och att grundvattennivån överstiger jordlagret med morän bör detta vara en sluten akvifer.

Markundersökning som har gjorts ungefär 10 m från observationsrör 106B206 visar på ett översta jordlager med fyllnad jord som är ungefär 0,5-1 m, ett 2 m lager och därefter 1,5 m friktionsjord mot bergets överyta. Marknivån vid detta observationsrör är +23,9 m, grundvattennivån är i medel +21,7 m och grundvattennivån är då ungefär 2 m under markytan. Detta betyder att grundvattennivån troligen går upp till lerans underkant och därmed är en sluten akvifer. Observationsröret är 4,89 m under markytan och bör vara placerad i moränen. Byggnationen vid Sockenplan ligger i utkanten av ett undre grundvattenmagasin och bedöms ligga intill ett grundvattenbildande område. Genom att det bedöms vara en grundvattendelare norr om dessa två observationsrör och sedan en fallande lutning från Enskede gård gymnasium mot observationsrören, antas det därför vara ett intermediärt område vid båda observationsrören.

6.2 Platsbeskrivning observationsrör 106B188

Observationsrör 106B188 ligger ungefär 250 m sydväst om Sockenplan och är placerat inom ett bostadsområde med villor som är 1-2 plan, se figur 14. Mätplatsen är inom ett större lerområde och observationsröret är placerat nära en svackan som går längst med Sockenvägen, i nord-västlig riktning (Berzell & Dehkordi 2017).

Från sonderingar som gjorts 10 m från observationsplatsen förekommer ett 1 m mäktigt lager med fyllnadsjord, ett lerlager med en mäktighet på 17 m och ovanför bergets överkant förekommer 1 m friktionsjord som troligen är morän. Markytan vid observationsplatsen är +18,1 m och medelgrundvattennivån är +16,9 m, detta betyder att grundvattennivån är ungefär 1,2 m under markytan. Grundvattennivån överstiger därmed det undre jordlagret och bör vara en sluten akvifer. Då inströmningsområdet inom delavrinningsområdet bland annat sker från söder om observationsröret, samt att utströmning sker nordväst bör det vara placerat inom ett intermediärt område (ibid.).

6.3 Platsbeskrivning observationsrör 106B177

Observationsrör 106B177 ligger ungefär 350 m från arbetsområdet i sydöstlig riktning, vid en grönyta inom ett villaområde. Det har inte gjorts några markunderökningar för jordlagerföljden vid just detta observationsrör, den närmsta undersökningen som har gjorts ligger ungefär 150 m norr om denna plats. I detta rör förekommer fyllnadsjord med en mäktighet som är ungefär 0,7-1 m, ett 4 m mäktigt lager med lera och som överlagrar friktionsjord som har en mäktighet på 2 m. Vid bedömning av jordlagerföljden för observationsrör 106B177 antas samma jordlagerföljd gälla som vid punkten där sondering har gjorts och friktionsjorden antas vara morän.

Observationsrör 106B177 är 4,5 m djupt men avståndet till bergöverytan är okänt. Grundvattennivån vid observationsröret är ungefär +19,9 m och markytan är +21,8 m, vilket betyder att grundvattennivån i genomsnitt är 1,9 m under markytan. Grundvattennivån överstiger därför troligen jordlagret med morän som antas vara överlagrat av lera. Det bör därför vara en sluten akvifer. Då observationsröret dessutom är placerat inom ett stort område som överlagras av lera och topografin är relativt flack bedöms det topografiska läget vara intermediärt.

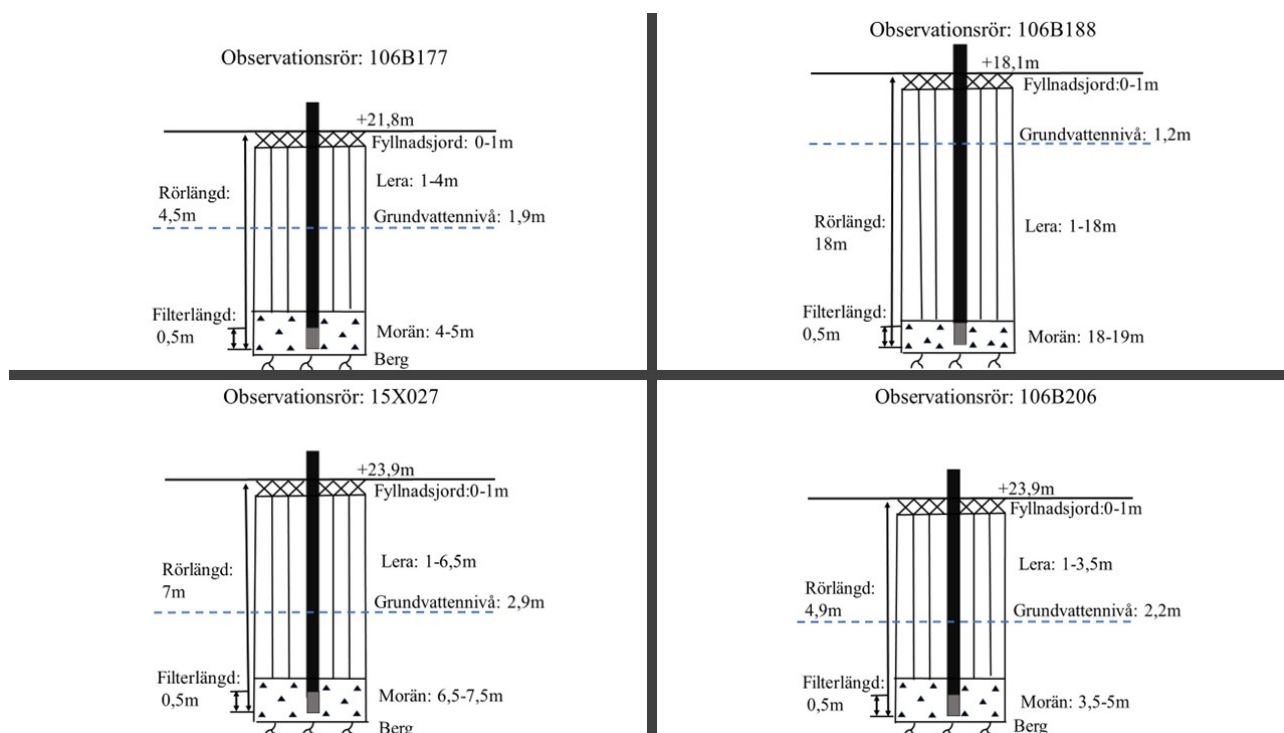
6.4 Sammanfattande hydrogeologiska egenskaper vid Sockenplan

Från områdesbeskrivningarna i avsnitt 6.1 till 6.3 sammanfattas olika faktorer som kommer att användas för att utvärdera tillförlitligheten vid beräkningar av den dimensionerande grundvattennivån för Sockenplan. Dessa fyra observationsrör bedöms ha likartade jordlagerföljder men mäktigheten på jordlagren varierar. I tabell 6 sammanfattas de översiktliga egenskaperna för observationsrören.

Tabell 6: Sammanfattade egenskaper och förhållanden för observationsrören i anslutning till Sockenplan. Då enbart [m] anges som enhet är detta angivet enligt referenssystemet RH2000

Rör/Faktorer	106B206	15X027	106B177	106B188
Ytbeskaffenhet	grönyta	grönyta	grönyta	asfalterad
Markyta [m]	+23,89	+23,3	+21,81	+18,13
Grv. nivå [m]	+21,7	+20,4	+19,9	+16,9
Rördjup [m under markytan]	4,89	7,0	3,47	18,0
Översta jordlager	postglacial lera	postglacial lera	postglacial lera	postglacial lera
Grv.förande jordlager	morän	morän	morän	morän
Akvifertyp	sluten	sluten	sluten	sluten
Topografiskt läge	intermediär	intermediär	intermediär	intermediär

Illustration av jordlagerföljden i förhållande till observationsren och grundvattnets medelnivå har gjorts för samtliga observationsrör i anslutning till Sockenplan, se figur 15. Detta illustrerar vart medelgrundvattennivån ligger i förhållande till observationsrörets underkant och jordlagren för observationsplatserna.



Figur 15: Angivna värden på marknivå, medelgrundvattennivå, rörlängd, jordlagerföljd och jordlagrens mäktighet för observationsrören tillhörande Sockenplan

7 Resultat

I resultat redovisas dimensionerande grundvattennivåer som beräknats med Chalmersmodellen och som subtraherats med beräknade värden från extremvärdesanalys. Olika hydrogeologiska egenskaper har testats för att undersöka hur tillförlitligheten påverkas om dessa varierar. Vidare undersöks utvalda observationsrör genom analys av nivåvariationer över tid. Selektade referensrör har även använts som observationsrör i beräkningarna av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och extremvärdesanalysen. Resultaten ämnar att besvara studiens huvudsyfte om hur valet av referensrör påverkar Chalmersmodellens tillförlitlighet. Frågeställningarna om vilken noggrannhet som Chalmersmodellen kan uppnå, om några specifika hydrogeologiska egenskaper påverkar beräkningarna och vilken tillförlitlighet som kan uppnås om ostörda förhållanden råder ska kunna besvaras med erhållna resultat.

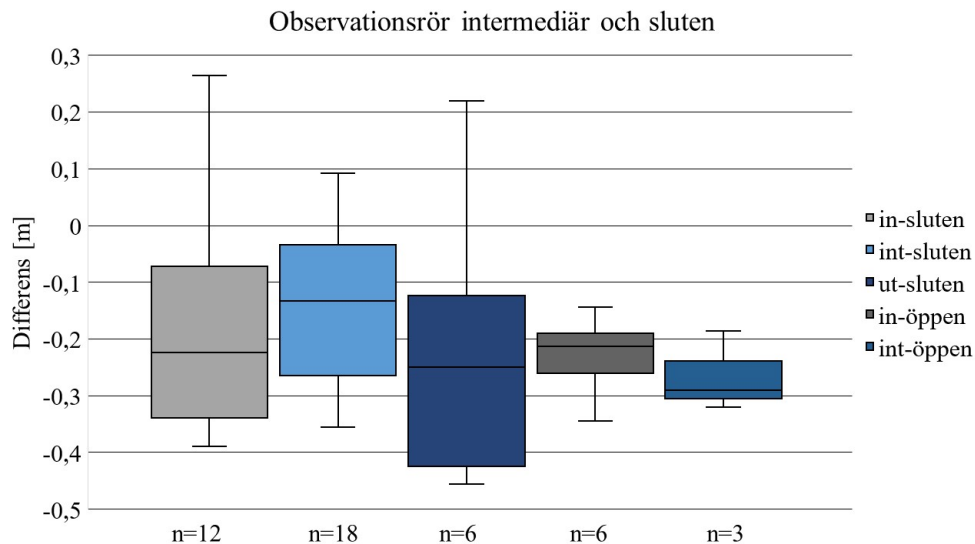
7.1 Jämförelse av hydrogeologiska egenskaper

För att undersöka differensens spridning av dimensionerande grundvattennivåer mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys har lådagram använts för att redovisa resultaten. Spridningen visualiseras av att lådans underkan markerar 25% av värdena ligger under denna gräns (första kvartilen) och lådans överkant representerar gränsen som 75% av värdena ligger under (tredje kvartilen). Medianen markeras av en linje i lådan och maximi- och minimivärden indikeras av linjerna som går från lådan.

Om differensen mellan dimensionerande grundvattennivåer, som beräknats med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys, går mot noll och kvartilavståndet mellan första och tredje kvartilen minskar anses resultatets noggrannhet öka. Detta betyder att skillnaden mellan värdena från de två olika beräkningsmetoderna är likartade.

Denna studie visar att om observationsröret och referensrör är placerade inom ett intermediärt område och slutna akvifer är medianen för differenserna mellan -0,25 m och -0,13 m, se figur [16](#). Ligger referensröret vid en öppen akvifer är medianen för differensen mellan -0,29 m till -0,21 m. Med fokus på topografiskt läge är medianen närmast noll då referensrör med intermediärt läge och slutna akvifer, dock är medianen med störst avstånd till noll referensrör med intermediärt läge och öppen akvifer.

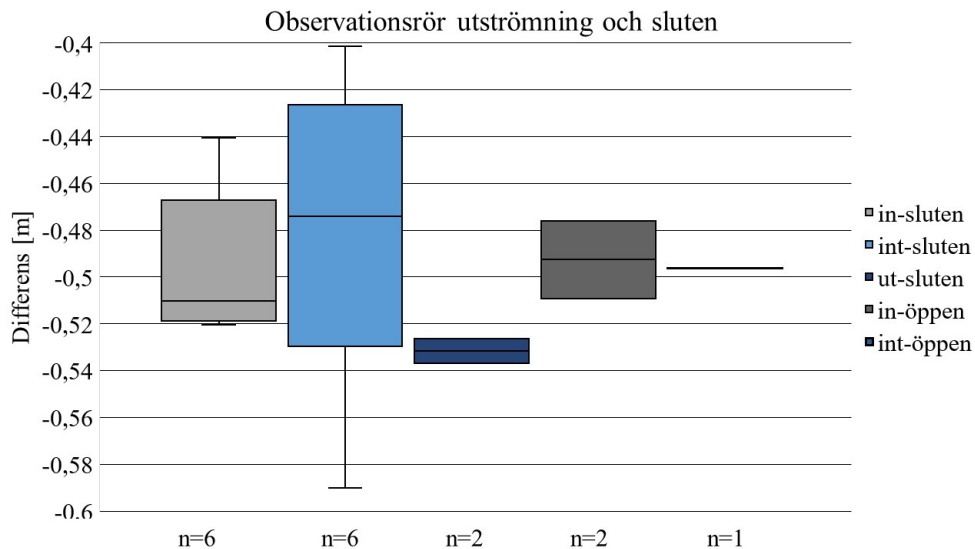
Då observationsrör och referensrör har samma hydrogeologiska egenskaper, intermediärt läge och slutna akvifer, är värdena generellt närmre en differens som är noll och även medianen, jämfört mot andra referensrör med andra egenskaper. Då observationsrör och referensrör har samma hydrogeologiska egenskaper ligger differenserna för dimensionerande grundvattennivåer mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys ungefär mellan -0,05 m och -0,25 m, se figur [16](#). Tillförlitligheten med referensrör som har andra hydrogeologiska egenskaper är spridd och medianerna ligger mellan -0,28 till -0,12 m.



Figur 16: Lådagram för differensen mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys där observationsrören har intermediärt läge och slutna akvifer. Respektive boxplot representerar en typ av observationsrör som har testats mot referensrör och x-axeln anger datamängden för varje boxplot. Legendan anger referensrörens egenskaper och 'in' är inströmning, 'int' intermediär, 'ut' utströmning. Akvifertypen anges som 'sluten' eller 'öppen'.

Är observationsrören placerade vid utströmningsområden med slutna akvifer ses resultaten vid jämförelse mot olika referensrör i figur 17. Att notera är att en liten datamängd finns som underlag för referensrör med utströmningsområde med slutna akvifer, inströmningsområde med öppna akvifer och intermediärt område med öppna akvifer.

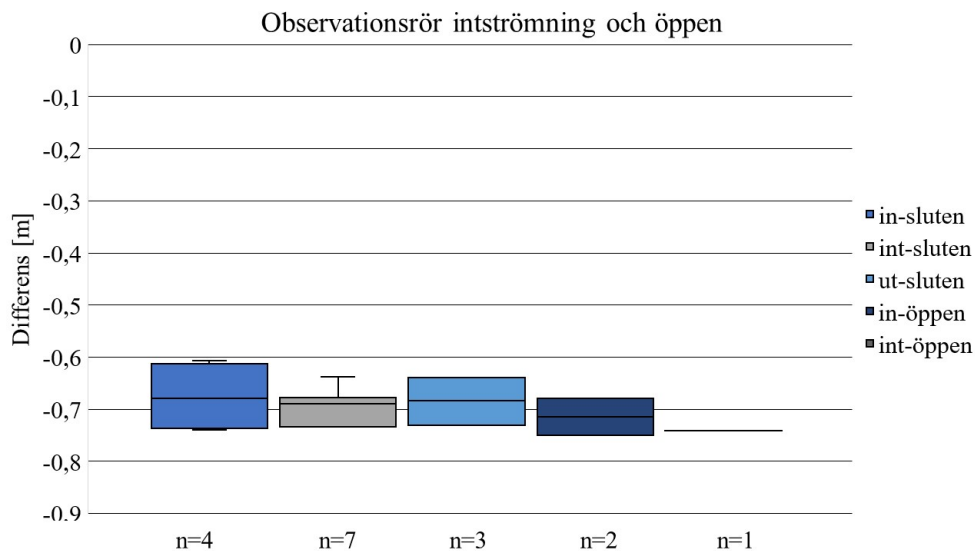
Är referensrören placerade vid en slutna akvifer då observationsröret är vid ett utströmningsområde och slutna akvifer är medianen för differensen mellan -0,53 m, och -0,47 m. Är referensrörets akvifer öppen varierar medianen mellan -0,49 m och -0,50 m. För topografiskt läge fås en median som är närmast noll då referensrören är placerad i ett intermediärt område och slutna akvifer (median -0,47 m), dock med störst spridning på differenserna mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys. De referensrör som ger upphov till störst avstånd till noll är då referensrören är placerade vid ett utströmningsområde och slutna akvifer. För dessa observationsrör finns bara de referensrör som har samma akviferstyp som observationsröret men inte samma topografiska läge.



Figur 17: Lådagram för differensen mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys där observationsrören ligger inom utströmningsområde och sluten akvifer. Respektive boxplot representerar en typ av observationsrör som har testats mot referensrören och x-axeln anger datamängden för varje boxplot. Legendan anger referensrörens egenskaper och 'in' är inströmning, 'int' intermediär, 'ut' utströmning. Akvifertypen anges som 'sluten' respektive 'öppen'.

Resultaten då observationsröret ligger vid ett inströmningsområde och öppen akvifer för differensen mellan dimensionerande grundvattennivåer som beräknats med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys kan ses i figur 18. Medianen är runt -0.7 m för samtliga referensrör med olika egenskaper med avseende på topografiskt läge och typ av akvifer. Detta innebär även att om både observationsröret och referensröret har samma egenskaper kan ingen förändrad noggrannhet ses. Detta gäller även för om det är samma typ av akvifer eller topografiskt läge.

Att ha i åtanke är att om referensrören ligger inom ett inströmningsområde och öppen akvifer samt intermediär och öppen akvifer finns det enbart två respektive ett värde för differenserna mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys.

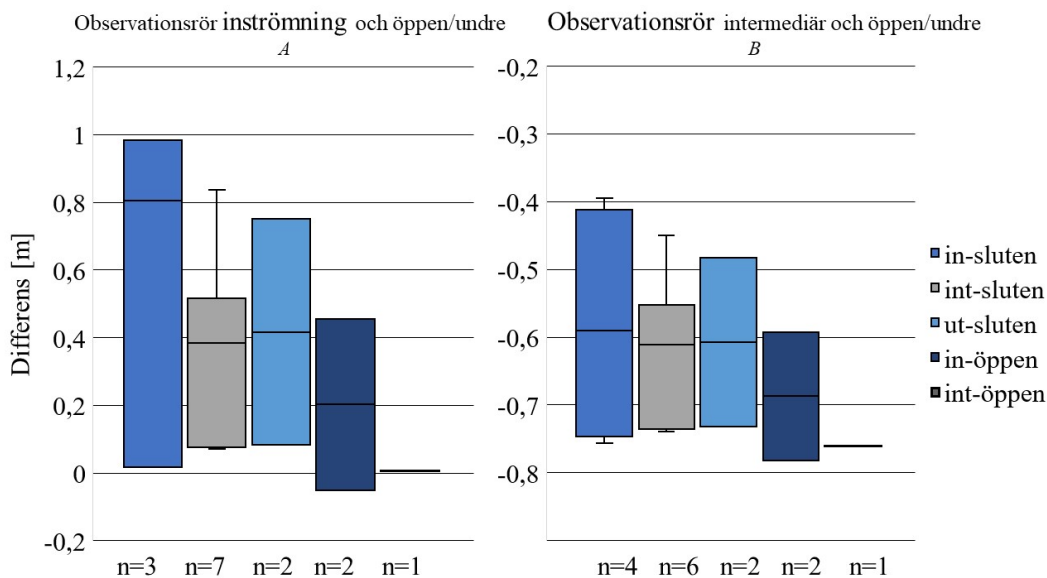


Figur 18: Lådagram för differensen mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys där observationsrören ligger inom inströmningsområde och öppen akvifer. Respektive boxplot representerar en typ av observationsrör som har testats mot referensrör och y-axeln anger datamängden för varje boxplot. Legendan anger referensrörens egenskaper där 'in' är inströmning, 'int' intermediär, 'ut' utströmning. Akvifertypen anges som 'sluten' respektive 'öppen'.

Observationsrör som inte har klassifierats som att de är vid akviferer under slutna förhållanden, trots överlagrande lerlager, anges som öppen/undre. Ett av dessa observationsrör ligger vid ett inströmningsområde och det andra ligger i ett intermediärt område och redovisas i separata lådagram, se i figur [19](#).

Generellt i A är att större delen av erhållna differenser är positiva, alltså att Chalmersmetoden beräknar ett högre värde på den dimensionerande grundvattennivån jämfört mot extremvärdeanalys. Om referensröret har öppen akvifer ligger dess median mellan 0,42 m och 0,07 m. För slutna akvifer ligger medianerna mellan 0,8 m och 0,38 m. Det är även för dessa referensrör som den största spridningen fås och där medianen för differenserna mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys har störst avstånd till noll. Om referensrören är placerade vid intermediärt område och vid en öppen akvifer fås det minsta avståndet till noll med en median på 0,07 m, dock utgörs detta enbart av ett värde. Om referensröret har samma topografiska läge som observationsröret och är placerat vid en öppen akvifer är medianen 0,2 m medan den är, som redan nämnt, 0,8 m om referensröret har slutna akvifer och samma topografiska läge.

I B är samtliga differenser negativa och Chalmersmetoden beräknar ett lägre värde på den dimensionerande grundvattennivån än extremvärdesanalys. Om referensrören ligger vid en öppen akvifer är medianerna mellan -0,76 m och -0,69 m och är referensrören belägna vid slutna akviferer är medianerna mellan -0,61 m och -0,59 m. Den median som har minst avstånd till noll är referensrör som är placerade vid en slutna akvifer och intermediärt område, störst avstånd fås då referensröret är placerat vid en öppen akvifer och intermediärt område, se figur [19](#).



Figur 19: Differenser mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys med observationsrören vid inströmning- eller intermediärt område och ej slutna förhållanden (öppen/undre). Respektive boxplot representerar en typ av observationsrör som har testats mot referensrör och y-axeln anger datamängden för varje boxplot. Legendan representerar referensrörens egenskaper: 'in' inströmning, 'int' intermediär, 'ut' utströmning. Akvifertypen anges som 'sluten' respektive 'öppen'. A redovisar resultaten då observationsröret ligger inom inströmningsområde och B redovisar resultaten för intermediärt område.

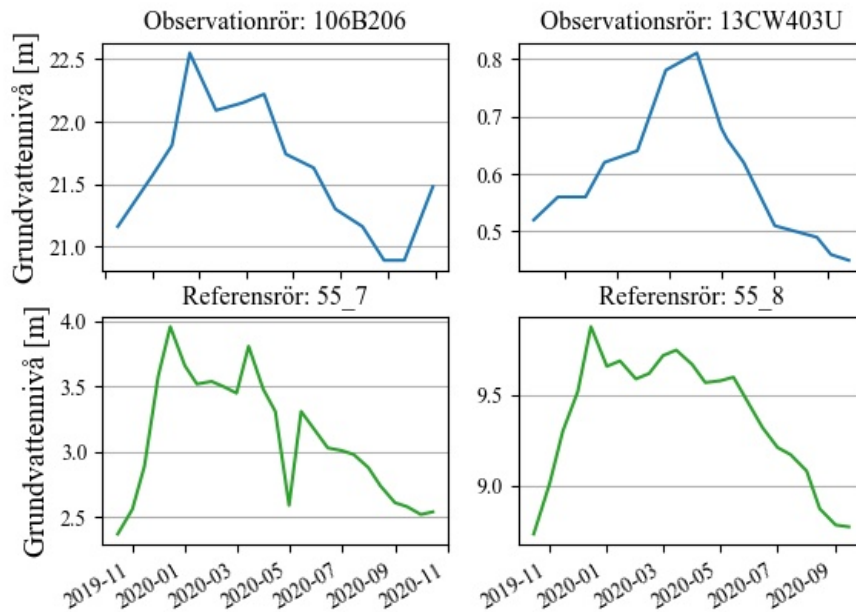
7.2 Jämförelse av samvariation av grundvattennivåer i utvalda observationsrör

För att kontrollera vilka mätpunkter som är lämpade att använda bör korttidsvariationerna av grundvattennivåerna i ett specifikt observationsrör jämföras mot variationerna i den kända akviferen som referensröret är placerad vid (Svensson & Sällfors [1985]). Både nivåvariationerna och storleken på nivåvariationerna är av vikt, eftersom egenskaperna för respektive akvifer påverkar hur nivåerna förändras. Även som en del i att besvara frågeställningen om Chalmersmetoden noggrannhet och hur hydrogeologiska egenskaper påverkar tillförlitligheten är det relevant att undersöka grundvattennivåerna över tid. Egenskaperna vid referensrören anges i bilaga B och beräknade värden av dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys samt differensen mellan dessa värden kan ses i bilaga C.

7.2.1 Nivåvariationer i slutna akviferer

Selekterade observationsrör som bedömts ligga inom slutna akviferer är observationsrören 106B206 samt 13CW403U och nivåvariationerna under observationstiden redovisas i figur 20. Observationsrör 106B206 ligger i ett intermediärt område och jämförs mot referensrör 55_7 med samma topografiska läge och akvifertyp. Grundvattennivåerna för observationsröret har likartade nivåvariationer över tid som referensröret, dock med viss tidsförskjutning jämfört mot referensröret. Amplituden för observationsröret är ungefär 1,5 m och motsvarande amplitud för referensröret är ca 1,5 m. Differensen som fås mellan de två beräkningsmetoderna för dimensionerande grundvattennivå är ungefär -0,24 m.

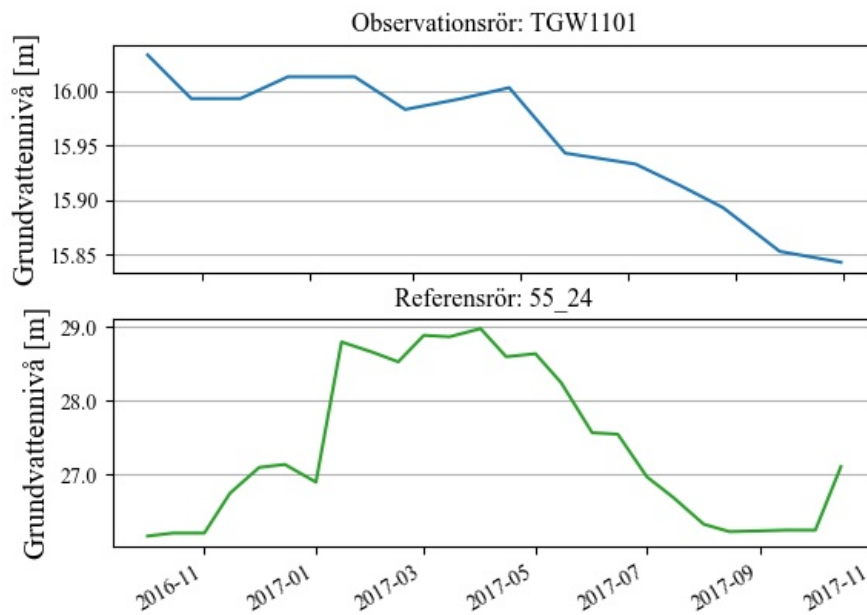
Observationsrör 13CW403U ligger inom ett område som bedöms vara inom ett utströmningsområde och jämförs mot referensrör 55_8 med samma akvifertyp och topografiskt läge. Tidpunkten för observationsrörets högsta nivå bedöms inte sammanfalla i närtid med referensrörets högsta nivå, utan är förskjuten, se figur 20. Däremot tycks nivåminskningen av grundvattennivåerna sammanfalla. Observationsrörets amplitud är ungefär 0,4 m medan referensröret är ungefär 1 m. Dimensionerande grundvattennivåer som beräknats med de två beräkningsmetoderna och med mätningar från dessa grundvattenrör har en differens som är ungefär -0,43 m.



Figur 20: Variationer av grundvattennivåer för observationsrör (106B206 och 13CW403U) och respektive referensrör (55_7 och 55_8) som ligger i slutna akviferer.

7.2.2 Nivåvariationer i öppna akviferer

För observationsrör som är placerade vid en öppen akvifer finns enbart ett observationsrör: TGW1101. Observationsröret ligger inom ett inströmningsområde och jämförs mot referensrör 55_24 med samma topografiska läge och akvifertyp, se figur 21. Hur dessa samvarierar övertid skiljer sig åt med avseende på hur grundvattennivån ökar, däremot tycks minskning av grundvattennivån efter den högsta nivån sammanfalla. Amplituden för observationsröret är ungefär 0,35 m och för referensröret är det 2,5 m. Differensen mellan dessa för beräknade värden av dimensionerande grundvattennivåer med de två olika beräkningsmetoderna är ungefär -0,75 m.



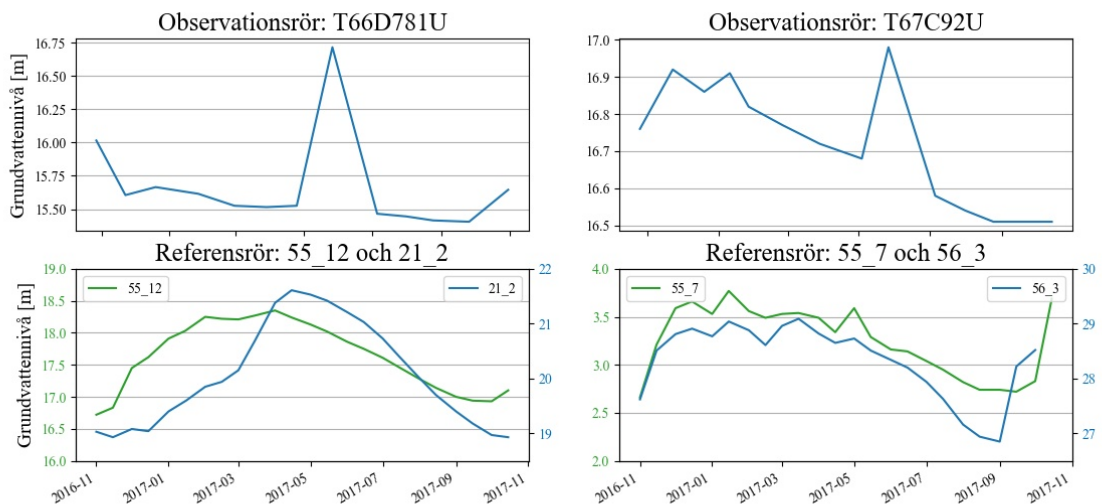
Figur 21: Variationer av grundvattennivåer för observationsrör respektive referensrör som ligger i öppna akviferer under observationstiden på ett år.

7.2.3 Nivåvariationer i öppna/undre akviferer

Grafer har även tagits fram för observationsrör som inte bedöms vara i slutna förhållanden, även fast det troligen finns ett övre lerlager. Observationsrör T66D781U antas ligga inom ett inströmningsområde och de två referensrören som används (55_12 och 21_2) ligger inom en sluten respektive öppen akvifer och har samma topografiska läge som observationsröret.

Nivåvariationerna för referensrör T66D781U och referensrör 55_12 tycks inte sammanfalla i tid och utifrån granskning av graferna i figur 22 tycks inte nivåerna ha samma nivåvariationer. Observationsrörets grundvattennivåer har en amplitud som är ungefär 1,25 m och för referensröret är amplituden ungefär 1,5 m. Differensen för dimensionerande grundvattennivåer då beräkningar med observationsrör T66D781U och referensrör 55_12 är -0,40 m.

För referensrör 21_2 sammanfaller högsta nivåerna i närtid mot referensrör T66D781U, se figur 22. Däremot hur nivåerna varierar över tid tycks inte följas åt mellan observationsröret och referensröret. Detta referensrör har en amplitud som är ca 2,5 m. Differensen som fås för beräknade värden av dimensionerande grundvattennivåer då observationsrör T66D781U används med detta referensrör är ungefär 0,45 m.



Figur 22: Variationer av grundvattennivåer för observationsrör (T66D781U och T67C92U) som ligger i öppna/undre akvifer och respektive referensrör (55_12, 21_2, 55_7 och 56_3) akviferer under observationstiden på ett år. Där referensrör 55_12 och 55_7 ligger inom slutna akviferer. 21_2 och 56_3 ligger inom öppna akviferer.

Referensrör T67C92U är också klassad som en öppen/undre akvifer och bedöms ligga inom ett intermediärt område. Observationsröret jämförs mot referensrör 55_7 som är placerat vid en slutna akvifer och 56_3 som ligger inom en öppna akvifer, båda dessa har samma topografiska läge som observationsröret. Grundvattennivåerna för observationsröret och referensrör 55_7 tycks vara likartade över tid, däremot har observationsrör en ökad grundvattennivå i slutet av juni, se figur 22. Amplituden för referensröret är ungefär 0,5 m och för referensröret är amplituden ungefär 1 m. Differensen mellan dimensionerande grundvattennivå som beräknats med Chalmersmodellen och extremvärdesanalys är ungefär -0,59 m.

För referensrör 56_3, som ligger vid en öppen akvifer, är grundvattennivåns variationer likartade med referensrör 55_7 och har därför även en likartad nivåvariation som observationsröret, se figur 22. Amplituden för referensrör 56_3 är ca 2 m. Differensen mellan beräknade värden på dimensionerande grundvattennivå med detta referensrör och observationsrör T67C92U är ungefär -0,76 m.

7.3 Dimensionerande grundvattennivåer då referensrör används som observationsrör

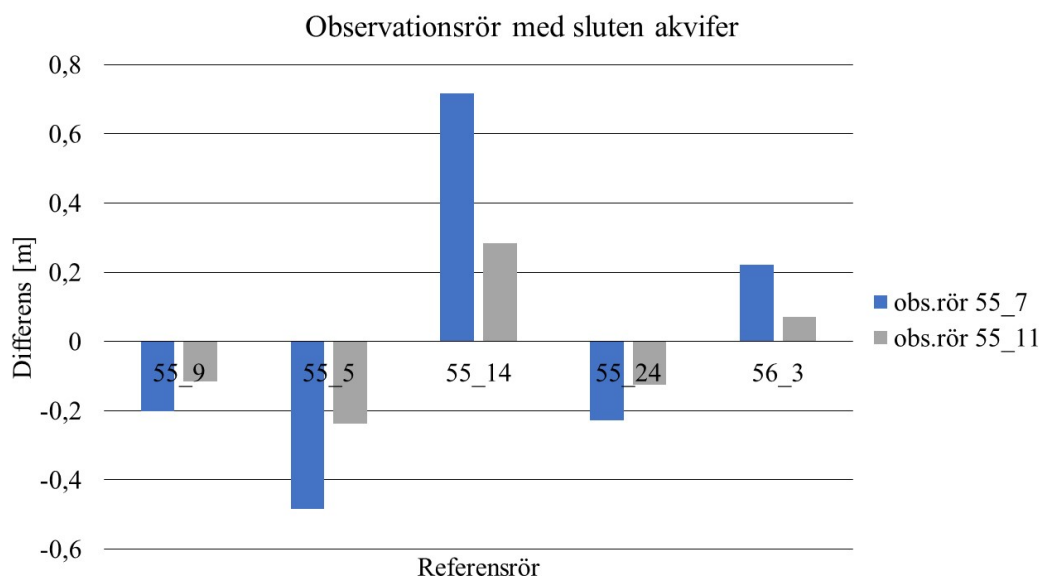
Som underlag för att besvara frågeställningen om hur noggrannheten av beräknade värden för dimensionerande grundvattennivåer med Chalmersmodellen påverkas om det är ej störda förhållanden har beräkningar gjorts genom att använda selekterade referensrör som observationsrör. Dessa resultat användas även som komplement för att besvara frågeställningarna om vilken noggrannhet Chalmersmodellen kan prognostisera dimensionerande grundvattennivåer och hur olika hydrogeologiska faktorer påverkar tillförlitligheten.

I denna del av resultatet redovisas och tolkas även nivåvariationerna av grundvatten under observationstiden för de observationsrör och referensrör som har använts. Referensrörens topografiska läge, akvifertyp, grundvattenförande jordlager samt översta jordlager kan ses i bilaga **B**. Även de grundvattenrör som för detta avsnitt benämns som observationsrör kan ses i samma bilaga. Nivåvariationerna som jämförs mellan observationsrör och referensrör redovisas i bilaga **D**.

7.3.1 Tillförlitlighet med olika referensrör

Resulten för dimensionerande grundvattennivåer med observationsrör som har slutna akviferer och olika typer av referensrör redovisas i figur **23**. Observationsrör 55_7 är belägen inom ett intermediärt område. Då detta observationsrör används för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med referensrör som har slutna akviferer fås differenser med extremvärdesanalys som varierar mellan -0,48 m och +0,72 m och med referensrör med öppna akviferer varierar differensen mellan -0,23 m och +0,22 m. Referensrör som ger upphov till lägst differens är 55_9 (0,20 m) med slutna akvifer och inströmningsområde, 55_24 (0,23 m) med öppen akvifer och inströmningsområde samt 56_3 (0,22 m) med öppen akvifer och intermediärt område. Då observationsröret och referensrör 55_5 med samma hydrogeologiska egenskaper används fås en differens mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys som är ungefär -0,48 m.

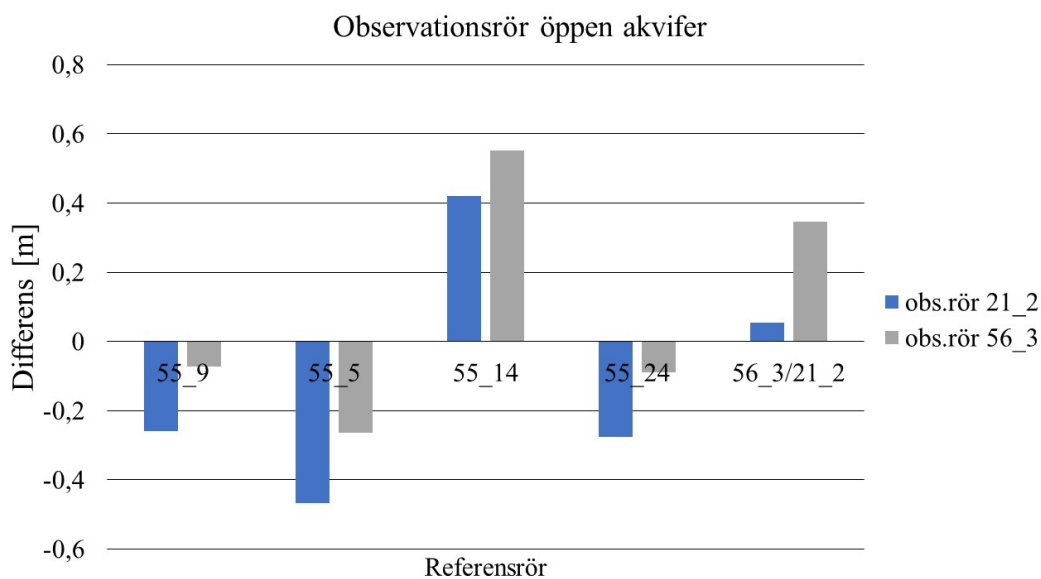
Då referensrör med slutna akviferer används för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med observationsrör med slutna akviferer och inom utströmningsområde (55_11) fås differenser mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys som varierar mellan -0,24 m och +0,28 m, se figur **23**. Med öppen akvifer varierar differensen mellan -0,12 m och +0,07 m. Referensröret som ger upphov till en differens av dimensionerande grundvattennivå mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys med minst avstånd till noll ligger vid en öppen akvifer och intermediärt område (56_3) och de som ger upphov till en differens med största avståndet till noll ligger vid en slutna akvifer och utströmningsområde. Om observationsrör 55_11 används med referensrör som har samma hydrogeologiska egenskaper (referensrör 55_14) fås en differens som är +0,28 m.



Figur 23: Stapeldiagram över differensen mellan dimensionerande grundvattennivåer som har beräknats med Chalmersmodellen och som subtraherats med det motsvarande dimensionerande värdet som har beräknats med extremvärdesanalys, då 55_7 och 55_11 används som observationsrör. De använda referensrören anges på x-axeln.

Beräkningar har även gjorts genom att använda två observationsrör som ligger vid öppna akviferer, se figur 24. Ett av dessa är observationsrör 21_2, vilket ligger inom ett inströmningsområde. Om referensrör används som har sluten akvifer varierar differensen av dimensionerande grundvattennivåer mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys mellan -0,46 m och +0,42 m, för referensrör med öppen akvifer varierar differensen mellan -0,27 och 0,06 m. Differensen med största avstånd till noll fås då referensrör 55_5 används, vilket ligger vid en sluten akvifer och intermediärt område. Differensen med det minsta avståndet till noll fås med referensrör 56_3 som ligger vid en öppen akvifer och intermediärt område. Om samma observationsrör och referensrör som har samma hydrogeologiska egenskaper (21_2) fås en differens av dimensionerande grundvattennivåer mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys på ungefär -0,06 m.

Används 56_3 som observationsrör, vilket är placerat vid en öppen akvifer och ett intermediärt område och referensrören är vid en sluten akvifer fås en differens av dimensionerande grundvattennivåer mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys mellan -0,26 m och +0,5 m. Med referensrör med öppen akvifer fås differenser mellan -0,09 m och +0,55 m. Den största differensen fås då referensröret är placerat vid en sluten akvifer och utströmningsområde (55_14) och den lägsta differensen fås då referensröret är placerat vid en sluten akvifer och inströmningsområde (55_9). Om samma hydrogeologiska egenskaper mellan observationsrör och referensrör (21_2) används för att beräkna dimensionerande grundvattennivå fås en differens mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys på +0,35 m.



Figur 24: Stapeldiagram över differensen mellan dimensionerande grundvattennivåer som har beräknats med Chalmersmodellen och som subtraherats med det motsvarande dimensionerande värde som har beräknats med extremvärdesanalys, då 21_2 och 56_3 används som observationsrör. De använda referensrören anges på x-axeln, 56_3/21_2 innebär att motsatt referensrör har använts mot observationsrören.

7.4 Analys av samvariation av grundvattennivåer under observationstiden

Ytterligare del i att utvärdera dimensionerande grundvattennivåer, som beräknats med selekterade referensrör som observationsrör, är genom analys av grundvattennivåer över tid. Detta illustreras i grafer över observationsrörens nivåvariationer under den kortare observationstiden mot nivåvariationerna av respektive referensrör under samma tidsperiod, samtliga grafer kan ses i bilaga D. Jämförelsen är baserad på de angivna hydrogeologiska egenskaper för referensrören i bilaga B. Figur 23 och figur 24 används som grund för koppling mellan samvariation, amplitud och prognostisering av dimensionerande grundvattennivåer.

Grundvattennivåerna för observationsrör och referensrör under observationstiden redovisas för observationsrör 55_7 och 55_11 med slutna akviferer i bilaga D, figur D1 och figur D2. Då observationsrör 55_7, som är placerat inom ett intermediärt område, jämförs mot ett referensrör 55_5 med samma karakteristiska faktorer, förekommer likartade högsta och lägsta nivåer (ca 1 m). Dock har nivåerna motsatta grundvattennivåtoppar, det vill säga att vid samma tid som observationsröret har dess minimala nivå har referensröret dess maximala. Differensen mellan dessa för dimensionerande grundvattennivåer är ungefär -0,5 m. Referensrör 55_14 och 56_3 har likartade nivåvariationer och amplitud som observationsrör 55_7. Referensrör 55_14 är placerat inom ett utströmningområde med slutna akviferer och differensen för dimensionerande grundvattennivåer är ungefär -0,2 m. Referensrör 56_3 ligger inom ett intermediärt område med öppen akvifer, differensen för dimensionerande grundvattennivå är ungefär 0,2 m.

Observationsrör 55_11 är placerat inom ett utströmningsområde och nivåvariationerna av grundvattnet mot ett referensrör med samma karakteristiska faktorer (55_14) bedöms även vara mest likartade med avseende på nivåvariationer över tid och amplituderna, jämfört mot resterande referensrör. Amplituden för både referensröret och observationsröret är ungefär 1 m. Differensen för dimensionerande grundvattennivåer för 55_14 som observationsrör är ungefär 0,7 m.

Vidare har även grafer tagits fram för observationsrör 21_2 och 56_3 som båda är öppna akviferer, se bilaga [D](#) i figur [D3](#) och figur [D4](#). Observationsröret 21_2 ligger inom ett inströmningsområde och vid jämförelse mot ett referensrör med samma hydrogeologiska egenskaper (referensrör (55_24)) skiljer sig både amplitud och nivåvariationer i tid. Den differens som erhålls för beräknade värden av dimensionerande grundvattennivåer är ungefär -0,3 m. För nivåer som sammanfaller i tid och med likartad amplitud är referensrören 56_3 samt 55_14. Observationsrör 56_3 är en öppen akvifer placerat inom ett intermediärt område, differensen mellan dessa är ungefär 0,05 m. Referensrör 55_14 ligger inom en sluten akvifer och i ett utströmningsområde, differensen mellan dessa är ungefär (0,4 m).

Observationsrör 56_3 saknar ett motsvarande referensrör som har samma akvifertyp och topografiskt läge. Men vid jämförelse mot ett referensrör med öppen akvifer och inströmningsområde (referensrör 55_21) sammanfaller variationerna av grundvatten över tid och likartad amplitud, differensen av beräknade dimensionerande grundvattennivåer är ungefär 0,3 m. Ytterligare ett referensrör (55_24) som ligger vid en öppen akvifer och inom ett inströmningsområde är amplituden ungefär 2 m för observationsröret och referensröret har en amplitud som är ungefär 1 m. Differensen för dimensionerande grundvattennivå mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys mellan dess är ungefär -0,1 m.

7.5 Normalsannolikhetsdiagram

Denna studie har även utfört en översiktlig analys av ingående grundvattennivåmätningar som använts i beräkningarna och om dessa kan antas vara normalfördelad. Utifrån Sällfors (1985) antas grundvattennivåer vara normalfördelade och ingående formler baserade på detta antagande. I denna studie, som nämnt i metod, används normalsannolikhetsplot för att undersöka om ingående mätdata är normalfördelad, se bilaga [F](#) och bilaga [E](#).

Översiktligt för dessa är att en större del av ingående mätningar kan antas vara normalfördelad utifrån granskning av normalsannolikhets diagrammen. Vissa observationsrör har avvikelser från normalfördelning, både för dess högsta och lägsta grundvattennivåer. För de mätningar som avviker från normalfördelningen är detta till största del de högsta eller lägsta grundvattennivåerna.

8 Diskussion

I detta avsnitt presenteras sammanställande tolkning och diskussion av erhållna resultat för att besvara studiens frågeställningar och syfte. I diskussionen behandlas även valet av metod, antaganden och kvaliteten på mätvärden. Studiens svagheter och förbättringsmöjligheter tas även upp i detta avsnitt.

8.1 Chalmersmodellens tillförlitlighet

Som en del i att undersöka Chalmersmodellens noggrannhet och tillförlitlighet vid beräkningarna av dimensionerande grundvattennivåer har 8 observationsrör och 15 referensrör undersökts. Olika akvifertyper och topografiska lägen testades för att undersöka inverkan på beräkningarna av dimensionerande grundvattennivåer.

En genomgående trend då observationsrör från studieområdena användes för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer är att differenserna till största del blir negativa. Det vill säga att Chalmersmodellen underskattar dimensionerande grundvattennivåer jämfört mot extremvärdesanalysen. Underskattade värden var mindre förekommande då referensrör användes som observationsrör. Orsaken till detta skulle kunna vara att med den korta mätserien som används från fallstudiens observationsrör är sannolikhet lägre att en maximal grundvattennivå inkluderas i mätningarna. Samtidigt som den ingående parametern i ekvation 4, som är baserad på nivåer från referensrören, inte kompenserar för detta i tillräckligt hög utsträckning. Ytterligare förklaring kan vara att då referensrör används som observationsrör har mätningar utförts med en högre frekvens jämfört mot fallstudiens observationsrör därmed ökad sannolikhet för att högre grundvattennivåer mäts. Sedan bör även förhållandena då referensrör används som observationsrör och referensrör i denna del av studien troligen vara mer överensstämmande baserat på hydrogeologiska egenskaper och grundvattennivåvariationer, eftersom flera av referensrören och observationsrören är belägna nära varandra. Men trots detta förekommer det även negativa differenser även då referensrör används som observationsrör som styrker att Chalmersmodellen tenderar att underskatta dimensionerande grundvattennivåer.

En följd av att Chalmersmodellen underskattar dimensionerande grundvattennivåer är att konstruktioner och omgivning kan utsättas för risker. Som nämnt i avsnitt 2.7 är grundvattnets nivå en viktig parameter för att ta fram säkerhetsfaktorer vid dimensionering av konstruktioner. Med ett underskattat värde ökar risken för att inverkan från grundvattnet inte beaktas i tillräckligt hög utsträckning, som kan leda till exempelvis brott eller ras. Dessutom anges Chalmersmodellen som alternativ metod för att beräkna dimensionerade grundvattennivåer i TK Geo, vilket utgör en grund för dimensionering av geokonstruktioner i Sverige.

Vidare från analys av dimensionerande grundvattennivåer som beräknats med Chalmersmodellen har ingen tydlig koppling till förväntad noggrannhet kunnat ses. Detta grundas på att resultaten inte är entydiga gällande koppling till specifik noggrannhet och kombinationer av akvifertyp och topografiskt läge.

Med detta menas att om observationsrör och referensrör väljs i enlighet men angivna kriterier enligt Svensson & Sällfors [1985] kan inget tydligt mönster för förväntad storleksordning av noggrannhet ses. Exempelvis då både observationsrör från fallstudien och referensrör har sluten akvifer och intermediärt område är medianen på differensen mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys -0,13 m, men för observationsrör och referensrör med sluten akvifer och utströmningsområde är medianen -0,53 m.

Även likartade resultat erhålls då referensrör används som observationsrör. Det vill säga att generellt kan inget entydigt samband ses till förväntad storleksordning på differensen mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys. Dock för denna del av studien tycks resultaten följa ett mönster för vilka referensrör som ger högst noggrannhet, alltså oberoende av vilken akvifetyp och topografiskt läge som observationsrören har fås likvärdiga resultat. Exempelvis tycks referensrören 55_9 och 55_24 kopplas till relativt låga differenser.

Generellt för erhållna differenser i fallstudien varierar dimensionerande grundvattennivåer mellan -0,75 m till +0,98 m i denna studie, där medelvärdet för samtliga beräknade differenser är ungefär -0,23 m, vilket är likartat med Nordberg [2020] som utfört en likvärdig undersökning av Chalmersmodellen. Även Rosén [1991] utfört studier på hur Chalmersmodellen uppskattar dimensionerande grundvattennivåer jämfört mot extremvärdesanalys. Denna studie har enbart gjorts för slutna akviferer, men även denna tyder på en spridning på upp till 1,7 m och medeldifferensen är -0,13 m för differensen mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys. Detta är även likartade resultat för slutna akviferer som ligger inom intermediärt område som erhålls i denna studie. Inom båda dessa studier har även Chalmersmodellen en tendens till att underskatta det dimensionerande grundvattennivån i jämförelse mot extremvärdesanalys.

8.2 Koppling till val av referensrör och Chalmersmodellens noggrannhet

En central del i denna studie är hur valet av referensrör påverkar Chalmersmodellens noggrannhet. Trots att storleksordningen av Chalmersmodellens noggrannhet i denna studie har varit svår att fastställa har vissa generella kopplingar till referensrörens egenskaper och påverkad tillförlitlighet kunnat ses.

Bland annat från observationsrör från fallstudien uppskattas differensen av dimensionerande grundvattennivån mellan Chalmersmodellen och extremvärdesanalys ge ett lägre avstånd till noll om referensrören är placerade vid en sluten akvifer. Där referensrör med öppen akvifer generellt ger upphov till differenser med större negativa differenser. Däremot kan inte lika tydlig skillnad ses då referensrör används som observationsrör med avseende på om en öppen akvifer skulle ha lägre noggrannhet.

Vid analys av resultaten då både referensrör och observationsrör har samma akvifertyp och topografiskt läge har inte något entydigt resultat kunnat ses för att detta skulle ge en ökad tillförlitlighet. Med matchande hydrogeologiska egenskaperna mellan observationsrör och referensrör fås generellt en större mediadifferens än om referensrör med avvikande hydrogeologiska egenskaper väljs. Däremot ger fallet med observationsrör i sluten akvifer och intermediärt området ett bättre resultat (låg differens) när referensröret har samma egenskaper.

Observationsrör som troligen är belägna under ett lerlager, men att grundvattennivån inte når upp till dess underkant (öppna/undre) får varierad tillförlitlighet om motsvarande referensrör ligger inom en sluten akvifer jämfört mot då dimensionerande grundvattennivåer i stället beräknas med en ett referensrör med öppen akvifer. Men vid analys av grundvattennivåer över tid ses att samvariationen och likvärdig amplitud av grundvattennivåer är mer överensstämmande då referensröret är placerat vid en sluten akvifer.

Som ytterligare del i att undersöka referensrörens påverkan på tillförlitligheten av dimensionerande grundvattennivåer har analys av grundvattennivåer över tid utförts. Resultatet tyder på att då observationsrör och referensrör är placerade vid en sluten akvifer, intermediärt område, samvarierar över tid samt avståndet mellan högsta och lägsta nivå blir noggrannheten högst. Observationsrör och referensrör tycks även ha en högre samvariation över tid och likartad amplitud då dessa är placerade vid sluta akviferer, jämfört mot om referensrör och observationsrör med öppna akviferer. Även denna analys tyder på att en högre tillförlitlighet kan förväntas om referensrör och observationsrör är belägna vid sluta akviferer.

Likartad jämförelse mellan nivåvariationer över tid, amplitud av grundvattennivå och hydrogeologiska egenskaper gjordes då referensrör användes som observationsrör. Från denna analys ses att med en hög samvariation mellan observationsrör och referensrör både med avseende på variationer över tid och amplitud tycks tillförlitligheten öka. Att referensrörens och observationsrörens grundvattennivåer är likartade sammanfaller i högre grad med att referensrör och observationsrör har samma akvifertyp snarare än topografiskt läge.

Sammantaget visar fallstudien att högre tillförlitlighet erhålls för slutna magasin än öppna. Parametern topografiskt läge har visat sig vara mindre viktig för resultatet, dock har ett bättre resultat erhållits när intermediärt topografiskt läge matchats mellan observationsrör och referensrör.

En förklaring till högre tillförlitlighet med slutna akviferer är att de slutna akviferer mellan referensrör och observationsrör har en tydligare samvariation. Detta förklarar även varför tillförlitligheten blir större då referensrör används som observationsrör eftersom dessa hade en tydligare samvariation. Här ses även en tydlig samvariation mellan rör i öppna akvifer och generellt ett bättre resultat med högre tillförlitlighet jämfört med fallstudien. Båda undersökningarna tyder på om man följer kriterierna från Svensson & Sällfors [1985] samt kontrollerar att referensrör och observationsrör samvarierar bör en högre tillförlitlighet kunna förväntas.

Att öppna akviferer i denna fallstudie inte uppskattar dimensionerande grundvattennivåer lika väl kan vara att de hydrogeologiska förhållandena möjligen är varierande. Bland annat från resultaten över nivåvariationer över tid och amplitud ses större skillnader mellan observationsrör och referensrör då båda har öppna akviferer. Ytterligare förklaring skulle kunna vara att öppna akviferer är mer påverkade av hydrologiska processer, så som nederbörd och infiltration. Däremot har underlaget för öppna akviferer varit mindre jämfört mot slutna akviferer. Ytterligare aspekt är osäkerheter i bedömningen av observationsrören som kan innebära att de hydrogeologiska egenskaperna missbedömts.

8.3 Studiens styrkor och svagheter

Från denna studie har ett större antal med observationsrör och referensrör använts för att undersöka dimensionerande grundvattennivåer som beräknats med Chalmersmodellen. På detta sätt har olika förhållanden vid observationsplatserna och referensplatserna kunnat testas i beräkningarna. Mönster för Chalmersmodellens tillförlitlighet har antagits kunna täckas in i denna studie, jämfört mot om ett färre antal observationsrör och referensrör använts. Även genom att denna studie använder mätningar av grundvattennivåer från antagna opåverkade områden bör detta ytterligare kunna ge en bredare uppfattning om vilken tillförlitlighet som fås med denna beräkningsmetod och vilka förhållanden som kan påverka prognostiseringen av dimensionerande grundvattennivåer.

Däremot innehåller denna studie svagheter som behöver beaktas vid bedömningen av Chalmersmodellens noggrannhet och tillförlitlighet när olika hydrogeologiska egenskaper undersöks. Bland annat för observationsplatserna har bedömningar av de hydrogeologiska förhållandena gjorts som en del i denna studie och därför inte varit kända i det inledande skedet då observationsrören selekterades. Där målet har varit att inkludera en bred variation av akviferstyper och topografisklägen. Valet av observationsrör har dessutom begränsats till studieområdena Station Sofia och Sockenplan, vilket ytterligare begränsat vilka observationsrör som kan inkluderas. Vidare har observationsrören valts baserat på att en så lång mätserie av grundvattennivåer ska kunna erhållas, detta för att också kunna applicera extremvärdesanalys för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer. Dessa begränsningar har inneburit att inte alla typer av kombinationer med akvifertyp och topografiskt läge har kunnat inkluderas och analyseras i denna studie.

Bedömningen av hydrogeologiska egenskaper av respektive observationsrör i denna studie är gjorts utifrån tidigare dokumentation som inte utförts för de specifika observationsplatserna, utan i större och mer generella drag. Genom att inga egna undersökningar i denna studie har utförts har djupgående bedömningar av mer detaljerade hydrogeologiska egenskaper inte varit möjligt. Utan dokumentationerna av respektive studieområde har legat till grund för att kunna dra slutsatser om typ av akvifer och topografiskt läge. Bedömningarna har inte heller kunnat verifieras då inga egna platsundersökningar har gjorts.

Utöver svårigheterna i att inkludera och bedöma olika hydrogeologiska egenskaper för observationsrören, förekommer också osäkerheter för referensrören. Det antas bland annat att referensrören, inklusive de som också används som observationsrör, är placerade inom områden som är ostörda. Dessa referensrör bedömdes dock vara placerade inom områden som var ostörda vid installation, vilket var under 60- och 70-talet. Under dessa år kan mycket ha förändrats i närområdet som i sin tur kan påverka grundvattennivåerna. Detta kan innebära att referensplatser i själva verket är störda och inte representerar naturliga nivåfluktuationer av grundvattennivåer.

Gällande vald metod för att utvärdera Chalmersmodellens noggrannhet och tillförlitlighet utgår denna studie från att dimensionerande grundvattennivåer som har beräknats med extremvärdesanalys är de mest exakta värdena. Detta är ett antagande som inte saknar invändningar då även denna beräkningsmetod innehåller osäkerheter. Bland annat grundas metoden på att ingående mätningar är normalfördelade vilket inte helt och hållet är ett korrekt antagande. I bilaga [F](#) och bilaga [E](#) framgår det att avvikelser från normalfördelningen förekommer.

Detta påverkar de antaganden som gjorts för Chalmersmodellen, eftersom även denna beräkningsmetod används för att beräkna återkomsttiden. Dock för vidare analys av hur beräkningsmetoderna i sig påverkar Chalmersmodellens tillförlitlighet bedöms inte ingå inom ramen för denna studie.

Ytterligare aspekt vid bedömning av beräkningarnas noggrannhet är kvaliteten på den ingående datan för att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med både extremvärdesanalys och Chalmersmodellen. Observationsrören har valts i största möjliga mån efter att en lång och frekvent datamängd. Dock har observationsrör där mätningar inte kontinuerligt gjorts den 15:e och den 1:a för varje månad valts, utan många mätningar har enbart utförts en gång per månad med längre uppehåll i grundvattennivåmätningarna. För att beräkna dimensionerande grundvattennivåer med extremvärdesanalys har det även varit önskvärt att mätningar utförts i mer än 10 år, dock har mätningar som utförts kortare även använts.

Dessa osäkerheter, både med avseende på metodval och ingående mätningar, behöver beaktas vid evalueringen av Chalmersmodellens tillförlitlighet vid beräkningar av dimensionerande grundvattennivåer. Dock bör den större kvantiteten av observationsrör och referensrör kunna bidra med säkrare slutsatser angående Chalmersmodellens tillförlitlighet och hur hydrogeologiska egenskaper påverkar beräkningarna. Dataunderlaget från studieområdena är även mer frekvent och mätningar har gjorts under en längre tid än vad som vanligtvis brukar förekomma. Därför bedöms ändå kvaliteten på dessa mätningar vara jämförelsevis hög, än om enbart mätningar som utförts några månader hade använts. Även om antropogen påverkan på referensrörens grundvattennivåer inte kan uteslutas bedöms dessa ändå vara placerade inom områden som inte är lika påverkade som observationsrören för Station Sofia och Sockenplan och representera naturliga fluktuationer av grundvattennivåer.

För bedömningen av hydrogeologiska egenskaper vid studieområdena förekommer osäkerheter då det inte har varit möjligt att verifiera om de hydrogeologiska egenskaperna vid platsen stämmer. Men utifrån givna förutsättningar bedöms beskrivningen av platserna vid observationsrören vara tillräcklig för att kunna användas i denna studie.

8.4 Framtida studier

Resultaten från denna studie var något mer osäkra och varierande för öppna akviferer och ytterligare förslag på vidare studie är att utföra analys av Chalmersmodellens tillförlitlighet då beräkningar görs enbart med denna typ av akvifer. Denna studie tycks även visa att högre tillförlitlighet kan erhållas om amplitud och samvariation är likvärdiga mellan referensrör och observationsrör. En djupare analys kan även utföras för att undersöka om något typ av statistiskt mått för dessa kan ge en högre tillförlitlighet.

Slutligen är ytterligare en viktig aspekt, som inte beaktats i denna studie, inverkan från klimatförändringar. Då dimensionerande grundvattennivåer ämnar till att förutse grundvattennivåer långt fram i tiden är det troligt att klimatförändringar kommer att påverka sannolikheten för att en viss maximal grundvattennivå inträffar.

9 Slutsatser

Denna studie visar att Chalmersmodellen tenderar att underskatta dimensionerande grundvattennivåer. Detta kan innebära risker vid dimensionering av konstruktioner eftersom grundvattnet används som en viktig inparameter för att ta fram säkerhetsfaktorer som riskerar att värderas för lågt.

Kopplingar ses till inverkan på tillförlitligheten i Chalmersmodellen för akvifertyp och topografiskt läge för denna fallstudie, vilket visar på högre tillförlitlighet för slutna akviferer jämfört mot öppna akviferer. En högre tillförlitlighet kan också förväntas om både observationsrör och referensrör ligger vid en sluten akvifer och intermediärt område. Dock är koppling till topografiskt läge och tillförlitlighet är svårbedömd.

Vid analys av Chalmersmodellens noggrannhet har inga tydliga kopplingar kunnat ses till att en viss kombination av hydrogeologiska egenskaper mellan observationsrör och referensrör givit uppehov till en viss storleksordning på noggrannheten, utan resultaten är varierande. Vilket leder till att det generellt i denna studie är svårt att dra några slutsatser om Chalmersmodellens förväntade storleksordning på noggrannheten.

För ostörda förhållanden, då referensrör användes som observationsrör, fås generellt en högre noggrannhet och mindre tydlig koppling till hydrogeologiska egenskaper och inverkan på tillförlitligheten.

Sammanvägningen av de två olika undersökningarna visar dock på att om samvariation mellan observationsrör och referensrör råder och det är vid likartade hydrogeologiska egenskaper kan en högre tillförlitlighet förväntas. Sammantaget av analysen visar alltså om kriterierna i enlighet med Svensson & Sällfors (1985) efterföljs och att en samvariation och likartad amplitud mellan observationsrör och referensrör väljas kan en högre tillförlitlighet förväntas.

Utifrån dessa slutsatser bör därför möjligen större vikt vid användning av Chalmersmodellen läggas på hur observationsrör samvarierar över tid och att de har likvärdiga amplituder, än att utgå från att de ska ha helt likvärdiga hydrogeologiska egenskaper. Eftersom även karakteriseringen av observationsplatserna både kan vara tidskrävande och inneha osäkerheter. Ytterligare tillägg för hur Chalmersmodellen används är att med slutna akviferer kan en högre tillförlitlighet förväntas, med det bör beaktas att modellen generellt tenderar att underskatta dimensionerande grundvattennivåer.

Referenser

- Akfidan, J. & Sadek, R. (2012). *Dimensionering och utförande av bottenplattor utsatta för upptryck*. sv. [2022-03-07].
- Anwar, N. & Najam, F. A. (jan. 2017). *Chapter One - Structures and Structural Design*. en. Utg. av N. Anwar & F. A. Najam. DOI: [10.1016/B978-0-12-804443-8.00001-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804443-8.00001-4). Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128044438000014> [2022-02-15].
- Bergdahl, U., Ottoson, E. & Malmborg, B. S. (1993). *Plattgrundläggning handbok*. sv. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/publikationsserier/i-samverkan-med-andra/plattgrundlaggning/> [2022-05-27].
- Berzell, A. & Dehkordi, E. (febr. 2017). *Miljöprövning för tunnelbana från Kungsträdgården till Nacka och söderort - Bilaga C*. sv. PM, s. 105.
- CEN (2004). *ENV 1997-1:1994: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. eng. Bryssel: European Committee for Standardization.
- CEN (2007). *EN 1997-2:2007: Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing*. eng. Brussels.
- EN 1990:2002 (2005). *Eurocode - Basis of structural design*. eng.
- Fetter, C. W. (2014). *Applied hydrogeology*. eng. 4 uppl. Edingburgh: Perarson Education Limited.
- Gilli, É., Mangan, C. & Mudry, J. (2011). *Hydrogeology Objectives, Methods, Applications*. eng. 3 uppl. Paris: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Gulvanessian, H. (2005). *Designers' Guide to Eurocode 7 - Geotechnical Design EN 1997-1*. eng. ICE Publishing. Tillgänglig: <https://app-knovel-com.ezproxy.its.uu.se/kn/resources/kpDGEGDEN1/toc?kpromoter=federation&> [2022-02-18].
- Haaf, E. M. (2015). *Extremvärdesanalys av grundvattennivåmätserier*. eng. [2022-02-28].
- Havs- & vattenmyndigheten (2018). *Grundvattennivå*. sv. [2022-07-25].
- Hägerström, H. (2021). *11.1.1 Teknisk beskrivning - arbetshandling*. sv. Teknisk rapport, s. 160.
- Katz, R. W., Parlange, M. B. & Naveau, P. (aug. 2002). *Statistics of extremes in hydrology*. en. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170802000568> [2022-03-01].
- Knutsson, G. & Morfeldt, C. O. (1995). *Grundvatten teori tillämning*. sv. 2 uppl. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.
- Loucks, D. P. & Beek, E. van (2017). *Water Resource Systems Planning and Management*. en. DOI: [10.1007/978-3-319-44234-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1). Tillgänglig: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-44234-1> [2022-03-01].
- Madsen, H., Rasmussen, P. F. & Rosbjerg, D. (1997). *Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modeling extreme hydrologic events: 1. At-site modeling*. eng. DOI: [10.1029/96WR03848](https://doi.org/10.1029/96WR03848). Tillgänglig: <https://agupubs-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.its.uu.se/doi/epdf/10.1029/96WR03848> [2022-03-01].
- MATLAB (u.å.). *Normal probability plot - MATLAB*. en. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/help/stats/normplot.html> [2022-07-06].
- MSB (u.å.). *Varför inträffar skred och ras?* sv. Tillgänglig: <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/naturolyckor-och-klimat/skred-ras-och-erosion/varfor-intraffar-skred-och-ras/> [2022-03-07].
- Nationalencyklopedin (u.å.). *inströmningsområde*. sv. Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/instr%C3%B6mningsomr%C3%A5de> [2022-07-19].
- Nordberg, I. (2020). *Dimensioning Groundwater levels A case study of the TK Geo method*. eng. [2022-02-20].
- Ramboll (u.å.). *Cut & cover tunnels*. en. Tillgänglig: <https://ramboll.com/services-and-sectors/transport/major-crossings-bridges-and-tunnels/cut-and-cover-tunnels> [2022-07-07].
- Region Stockholm (u.å.). sv-SE. Tillgänglig: <https://nyatunnelbanan.se/press/> [2022-03-14].
- Rosén, B. (jan. 1991). *Prognoser av grundvattennivåer / portryck*. sv.
- SGF (2021). *Dimensionerande grundvattennivåer - Beskrivning av projektets status sommaren 2021*. sv. Tillgänglig: <http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=7073> [2022-08-09].
- SGI (febr. 2022). *Jordarter*. Tillgänglig: <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara-och-kvicklara/> [2022-07-25].
- SGU (okt. 2019a). *Hydrogeologisk bakgrund*. sv. Tillgänglig: <https://www.sgu.se/anvararstod-for-geologiska-fragor/bedomning-av-influensomrade-avseende-grundvatten/hydrogeologisk-bakgrund-forutsattningar/> [2022-07-25].
- SGU (2019b). *Hydrogeologiska förutsättningar*. sv. Tillgänglig: <https://www.sgu.se/anvararstod-for-geologiska-fragor/bedomning-av-influensomrade-avseende-grundvatten/utgangslage-och-utredningsstrategi/hydrogeologiska-forutsattningar/> [2022-07-19].

- SGU (maj 2022). *Så mäter SGU grundvattennivåer*. sv. Tillgänglig: <https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/om-grundvattennivaer/sa-mater-sgu-grundvattennivaer/> [2022-07-26].
- SGU (u.å.[a]). *SGU:s grundvattennät*. sv. Tillgänglig: <https://www.sgu.se/grundvatten/miljoovervakning-av-grundvatten/sgus-grundvattennat/> [2022-02-24].
- SGU (u.å.[b]). *SGUs Kartvisare- Jordarter 1:25 000- 1:100 000*. Tillgänglig: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-25-100.html> [2022-03-24].
- SGU (u.å.[c]). *SGUs Kartvisare- Jorddjup*. sv. Tillgänglig: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jorddjup.html> [2022-04-01].
- SMHI (april 2021a). *Återkomsttider*. sv. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/extremer/aterkomsttider-1.89085> [2022-02-27].
- SMHI (maj 2021b). *Det hydrologiska året*. sv. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattnets-kretslopp/det-hydrologiska-aret-1.280> [2022-03-02].
- SMHI (u.å.). *Vattnets kretslopp - förenar hydrologi, meteorologi och oceanografi | SMHI*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattnets-kretslopp/vattnets-kretslopp-forenar-hydrologi-meteorologi-och-oceanografi-1.20615> [2022-03-03].
- Sweco/Typsa (2020). *9711- Sockenplan etapp 1 11.1.1 Teknisk Beskrivning- Anläggning*. sv.
- Svensson, C. & Sällfors, G. (1985). *Beräkning av dimensionerande grundvattentryck - 1. Göteborgsregionen*. sv. Tekn. rapport. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Svensson, C. & Sällfors, G. (1988). *Beräkning av dimensionerande grundvattentryck - 2. Stockholmsregionen*. sv-SE. Tekn. rapport, s. 99.
- Svensson, C. (1984). *Analys och användning av grundvattennivåobservationer*. sv. Avhandling. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Todd, D. K. & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. eng. 3 uppl. University of California: John Wiley & Sons, Inc.
- Trafikverket (2016a). *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13*. Tillgänglig: <https://trvdokument.trafikverket.se/Versioner.aspx?spid=27&dokumentId=TDOK%202013%3a0667> [2022-02-23].
- Trafikverket (2016b). *Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktioner-TR Geo 13*. sv. Tillgänglig: <file:///C:/Users/andre/Zotero/storage/AJZ7GN6D/Versioner.htm> [2022-02-03].
- USGS (u.å.). *What is the difference between a confined and an unconfined (water-table) aquifer?* | U.S. Geological Survey. eng. Tillgänglig: <https://www.usgs.gov/faqs/what-difference-between-confined-and-unconfined-water-table-aquifer> [2022-02-02].
- Wahlgren, C.-H., Schoning, K., Tenne, M. & Hansen, L. M. (maj 2018). *Stockholmsområdets berggrund, jordarter, geologiska utveckling och erfarenheter från infrastrukturprojekt*. sv. SGU-rapport. Uppsala, s. 108.
- Westdahl, C. (2019). *Tunnelbana till Nacka och Söderort 7715- anläggningsentreprenad Sofia 13.2 Markteknisk undersökningsrapport (MUR) Geoteknik och hydrogeologi*. sv. Teknisk rapport.
- Ödlund Eriksson, L. (2020). *Grundvattenmagasin - Ord, begrepp och några medskick* | LinkedIn. sv. Tillgänglig: <https://www.linkedin.com/pulse/grundvattenmagasin-ord-begrepp-och-n%C3%A5gra-medskick-%C3%B6dlund-eriksson/?originalSubdomain=se> [2022-03-17].

A Frekvensfaktorer

Tabellvärden för frekvensfaktorer t_T för olika återkomstintervall som används i ekvation 8. Värdet som används är det för 100 års återkomsttid.

Tabell A1: Frekvensfaktor t_T för normalfördelning vid olika återkomstintervall (Svensson & Sällfors 1985)

T år	t_T
10	1,2816
20	1.6449
50	2.0538
100	2.3264
200	2.5758
500	2.8782

B Hydrogeologiska egenskaper för referensrör

Tabell B1: Grundläggande karakteristiska egenskaper för de referensrör som använts i denna studie och som hämtats från SGU. Informationen har tagits från kartvisaren Grundvattennivåer- tidsserie samt information om översta jordlager för dessa platser har hämtats från kartvisare Jordarter 1:25 000-1:1 000 000 (SGU [u.å.\[a\]](#)/[\[b\]](#))

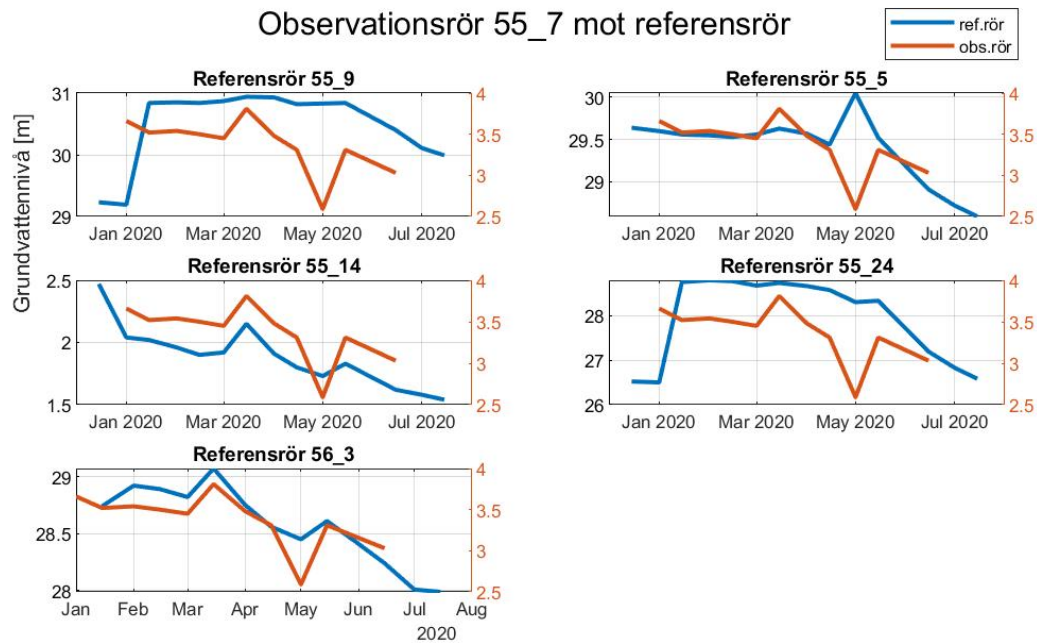
	Referensrör	Startdatum för mätning	Topografiskt läge	Akvifertyp	Grundvattenförande jordlager	Översta jordlager
Vaxholm	55_1	1968	intermediär	sluten	morän	postglacial lera
	55_3	1968	intermediär	sluten	morän	postglacial lera
	55_5	1968	intermediär	sluten	morän	torv/ lera/morän
	55_7	1969	intermediär	sluten	morän	postglacial lera
	55_8	1968	intermediär	sluten	morän	postglacial lera
	55_9	1968	inströmning	sluten	morän	sandig morän
	55_11	1968	utströmning	sluten	morän	postglacial lera
	55_12	1968	inströmning	sluten	morän	sandig morän
	55_13	1968	inströmning	sluten	morän	kärrtorv
	55_14	1968	utströmning	sluten	morän	postglacial lera
	55_17	1968	intermediär	sluten	morän	postglacial lera
	55_24	1975	inströmning	öppen	morän	sandig morän
Haninge	56_3	1968	intermediär	öppen	morän	glacial lera
	56_4	1968	intermediär	sluten	morän	glacial lera
Sigtuna	21_2	1965	intermediär	öppen	morän	postglacial lera

Figur C2: Beräknade värden från selekterade observationsrör och referensrör av dimensionerande grundvattennivåer och extremvärdesanalys samt differensen mellan beräknade värden.

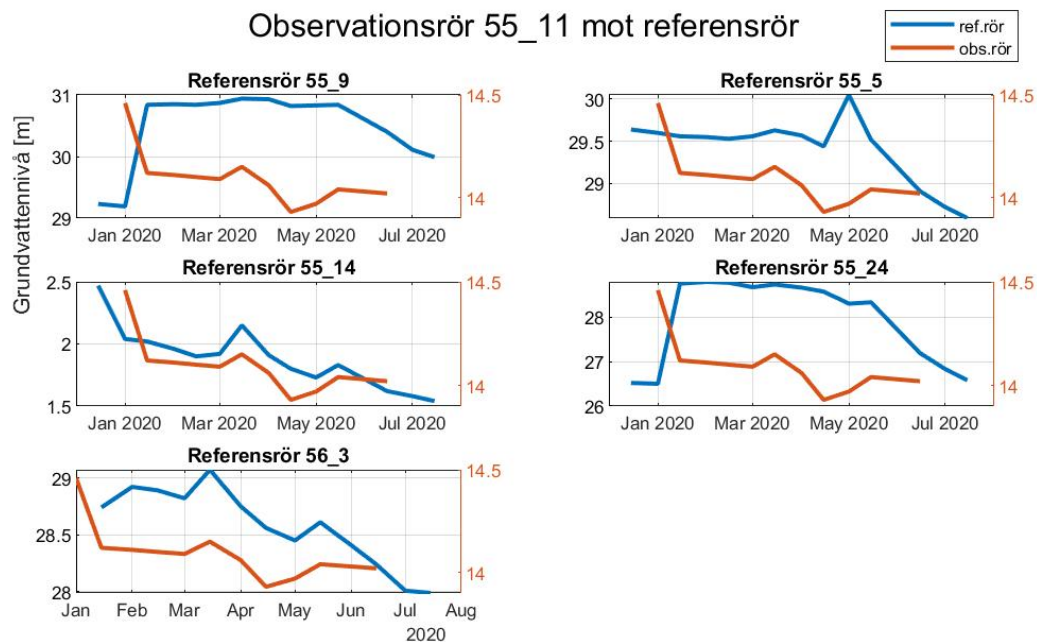
Allmänt

Observationsrör	Referensrör	Dim.värde 100 år	extremvärde	Dirrefens extremvärdes
106B206	55_7	23,01466981	23,25561501	-0,240945199
13CW403U	55_8	1,01343089	1,448480781	-0,435049891
TGW1101	55_24	16,05759014	16,80783163	-0,750241494
T66D781U	21_2	17,4030358	16,94832578	0,454710017
T66D781U	55_12	17,93241353	16,94832578	0,984087746
T67C92U	55_7	17,24371771	17,83058482	-0,586867112
T67C92U	56_3	17,0700288	17,83058482	-0,76055602

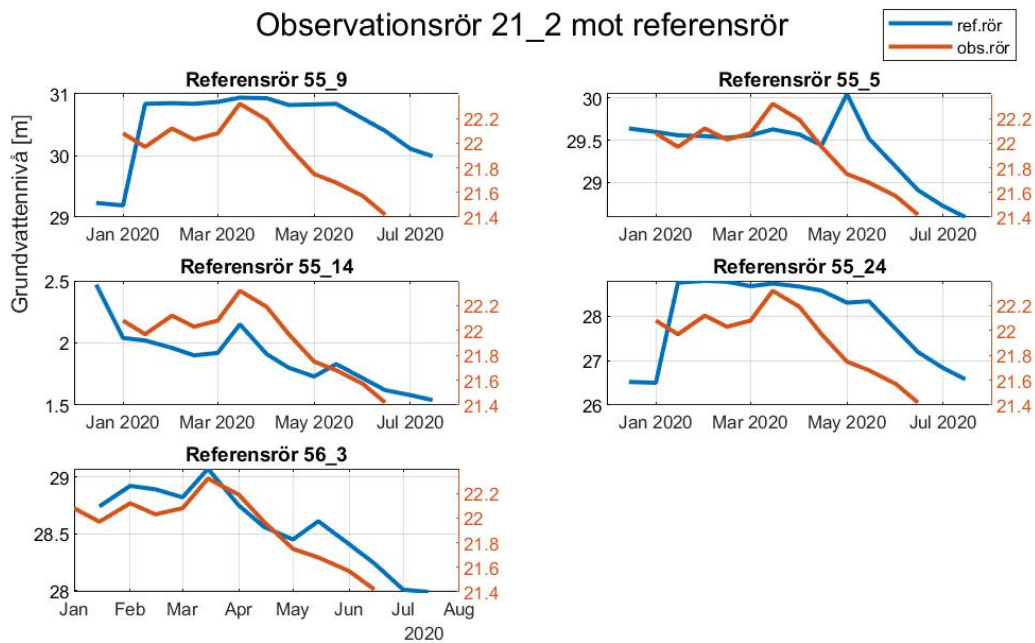
D Grundvattennivåer med referensrör som observationsrör



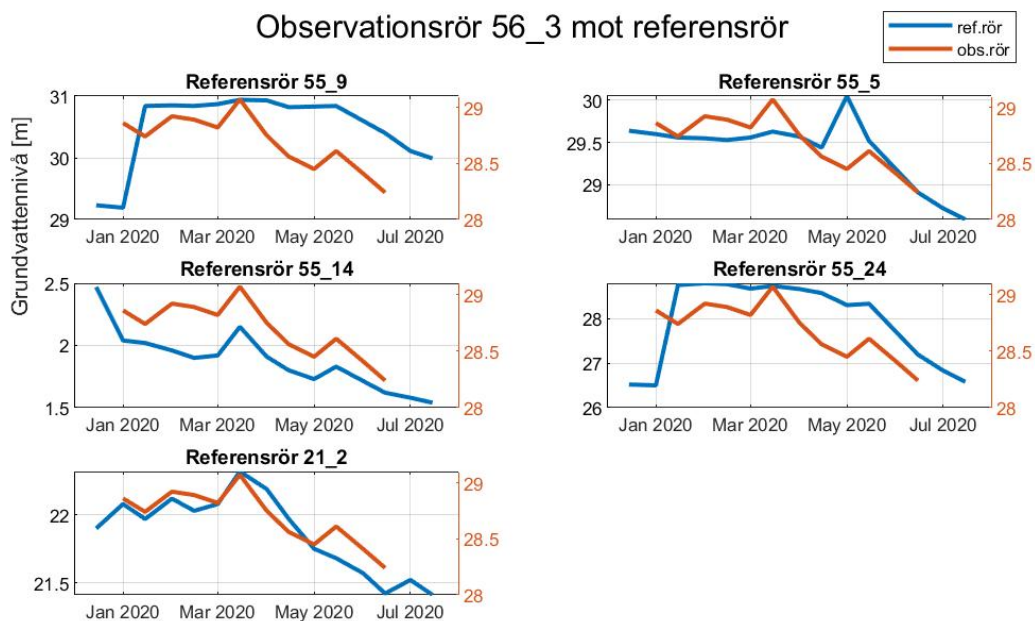
Figur D1: Grundvattennivåer under observationstiden med 55_7 som observationsrör (orange linje) och respektive referensrör (blå linje).



Figur D2: Grundvattennivåer under observationstiden med 55_11 som observationsrör (orange linje) och respektive referensrör (blå linje).

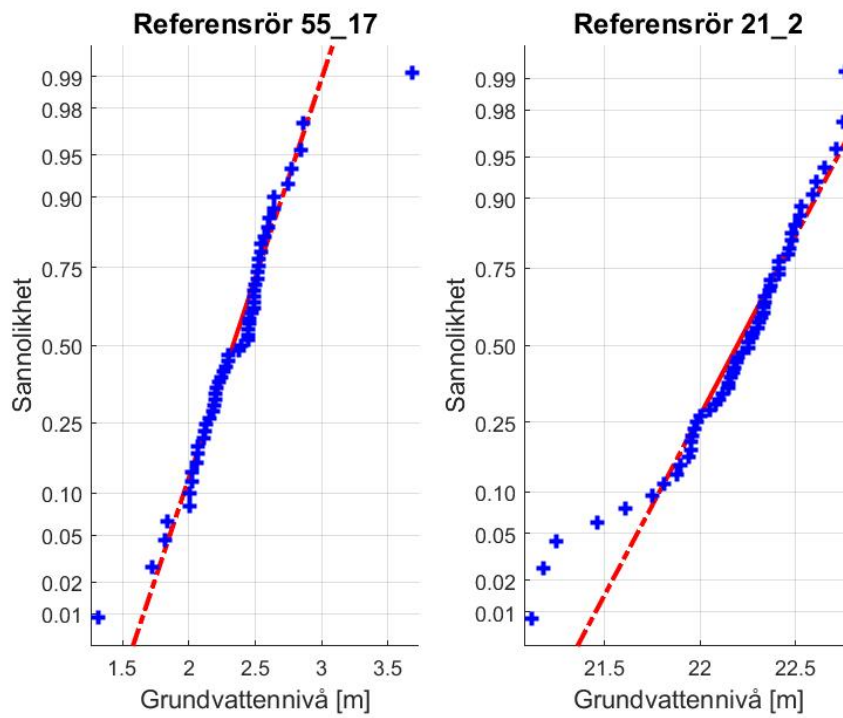


Figur D3: Grundvattennivåer under observationstiden med 21_2 som observationsrör (orange linje) och respektive referensrör (blå linje).

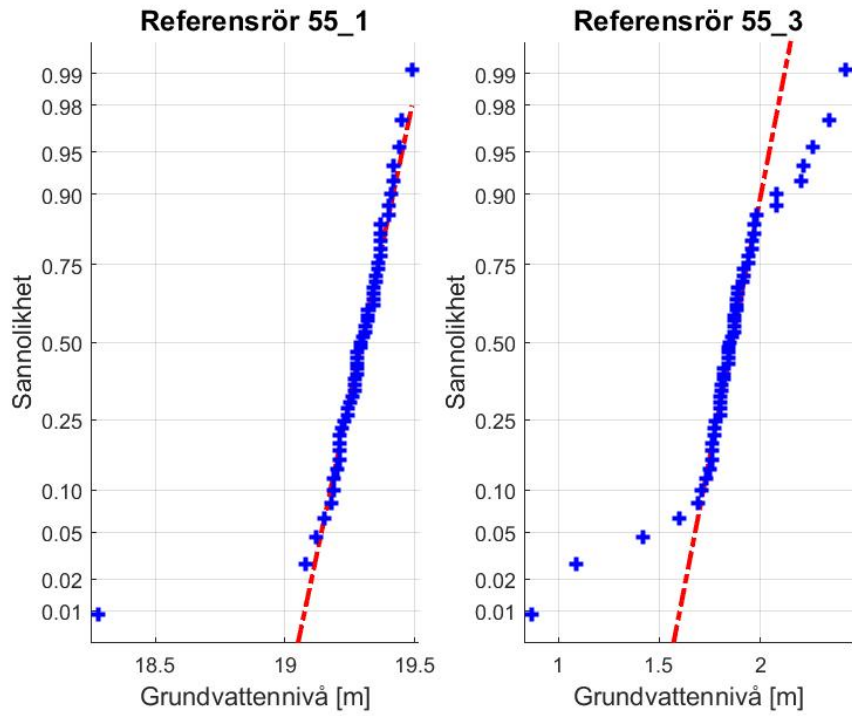


Figur D4: Grundvattennivåer under observationstiden med 56_3 som observationsrör (orange linje) och respektive referensrör (blå linje).

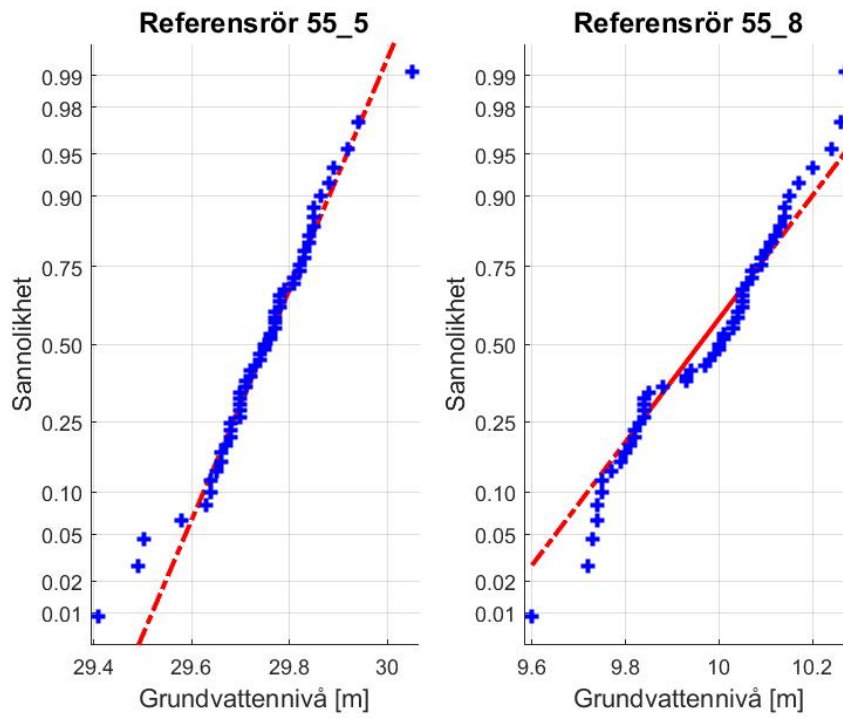
E Normalsannolikhetsdiagram över referensrör



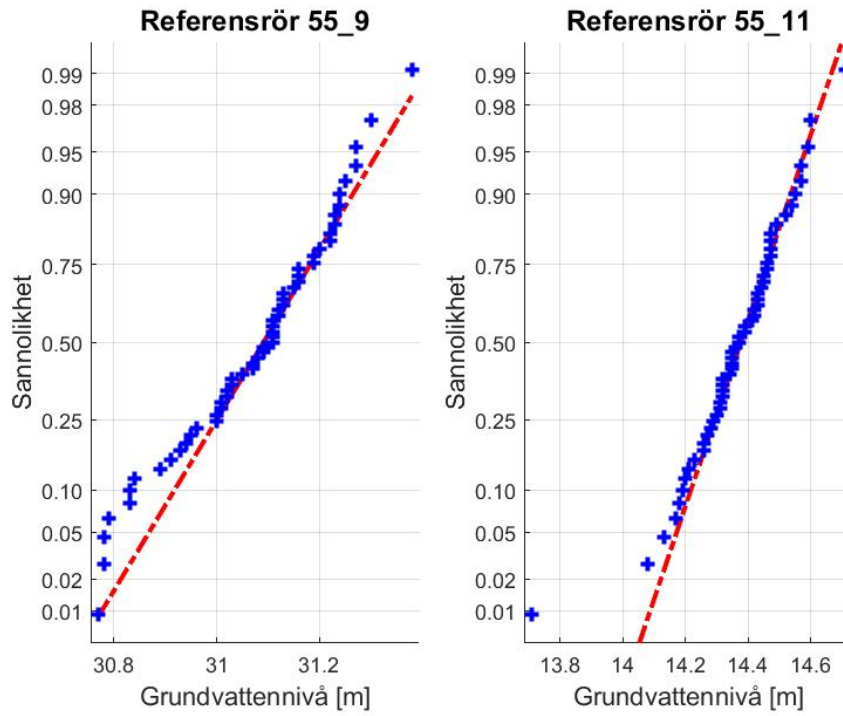
Figur E1: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_17. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger kryssen längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad. och 21_2.



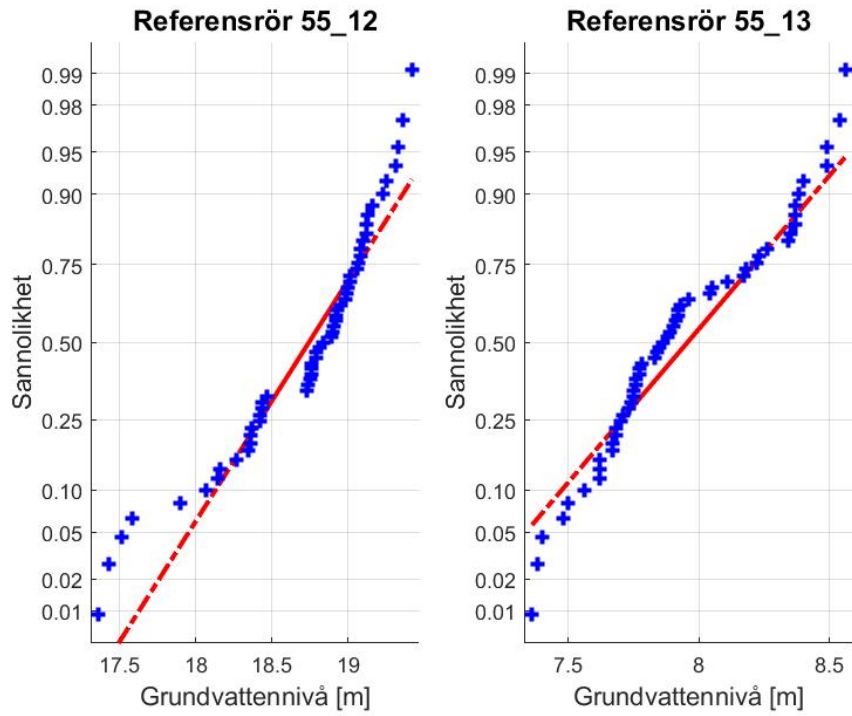
Figur E2: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_1 och 55_3. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



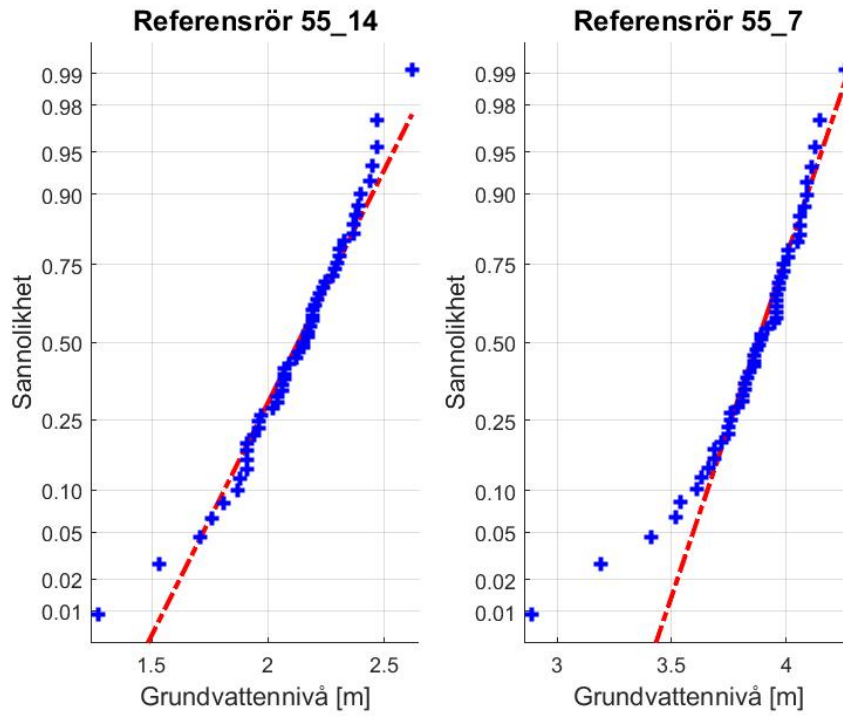
Figur E3: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_5 och 55_8. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



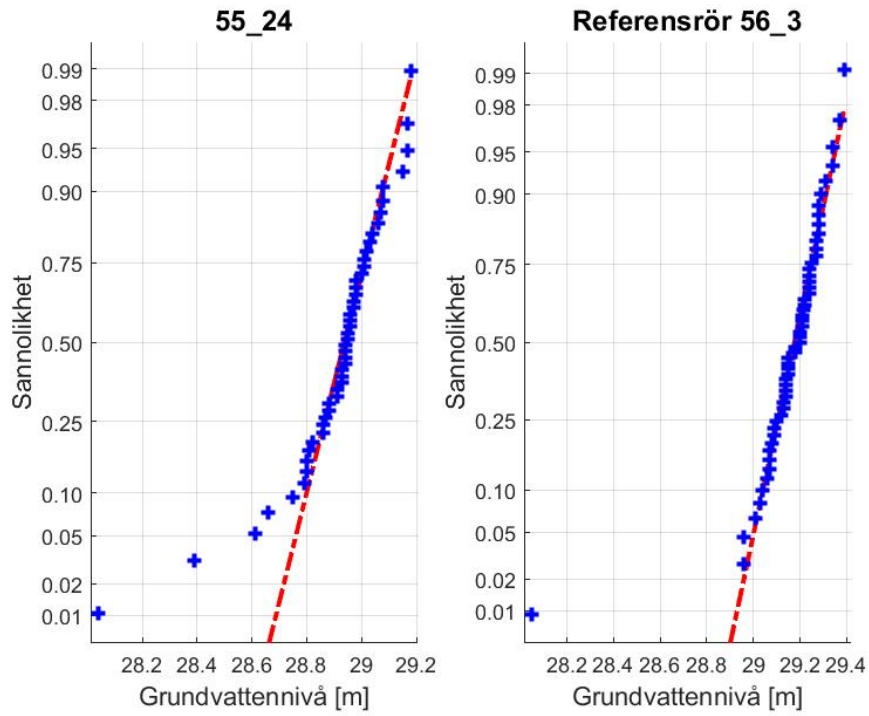
Figur E4: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_9 och 55_11. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



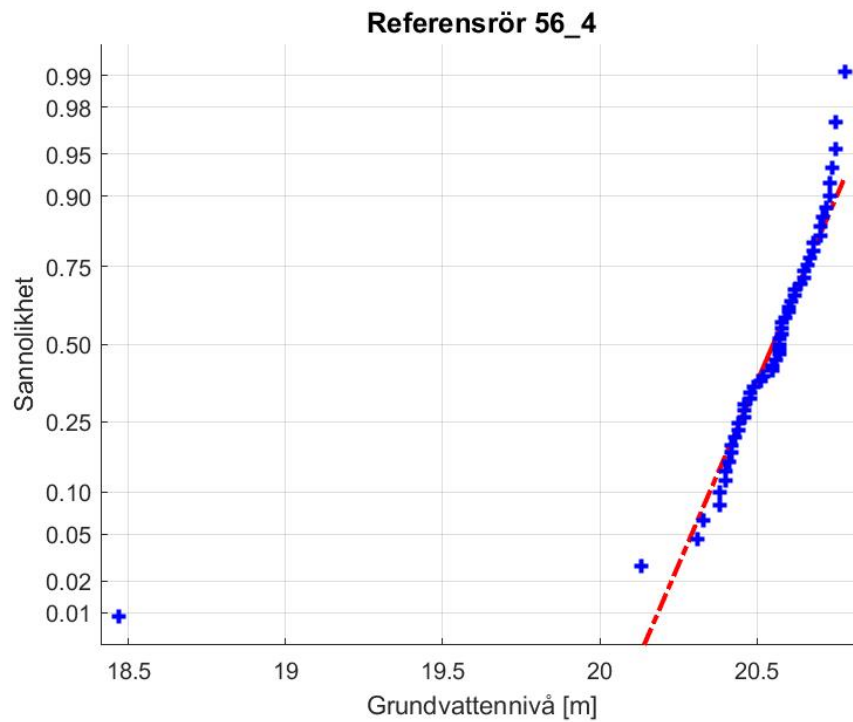
Figur E5: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_12 och 55_13. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



Figur E6: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_14 och 55_7. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.

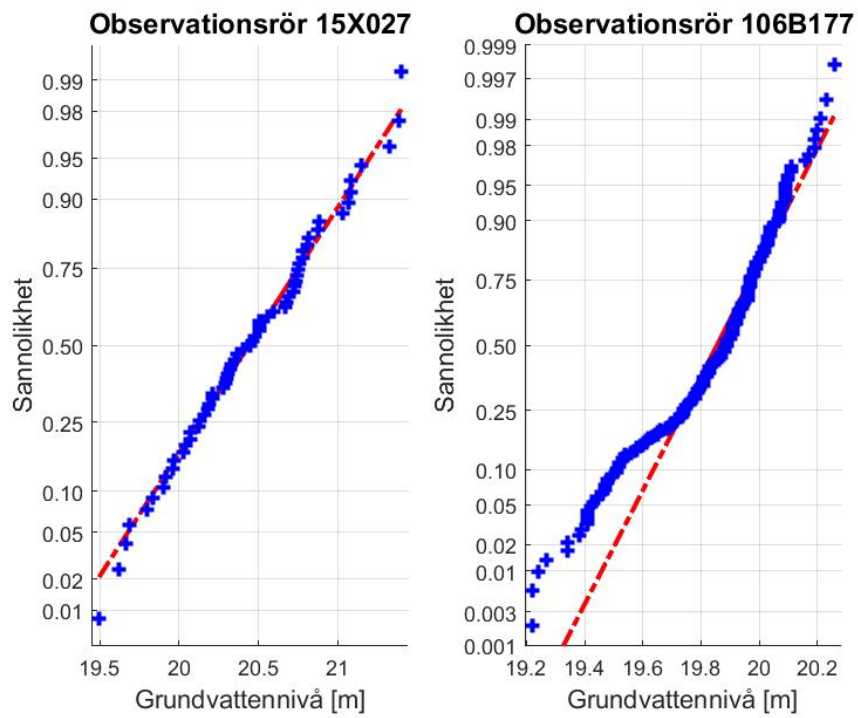


Figur E7: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 55_24 och 55_3. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.

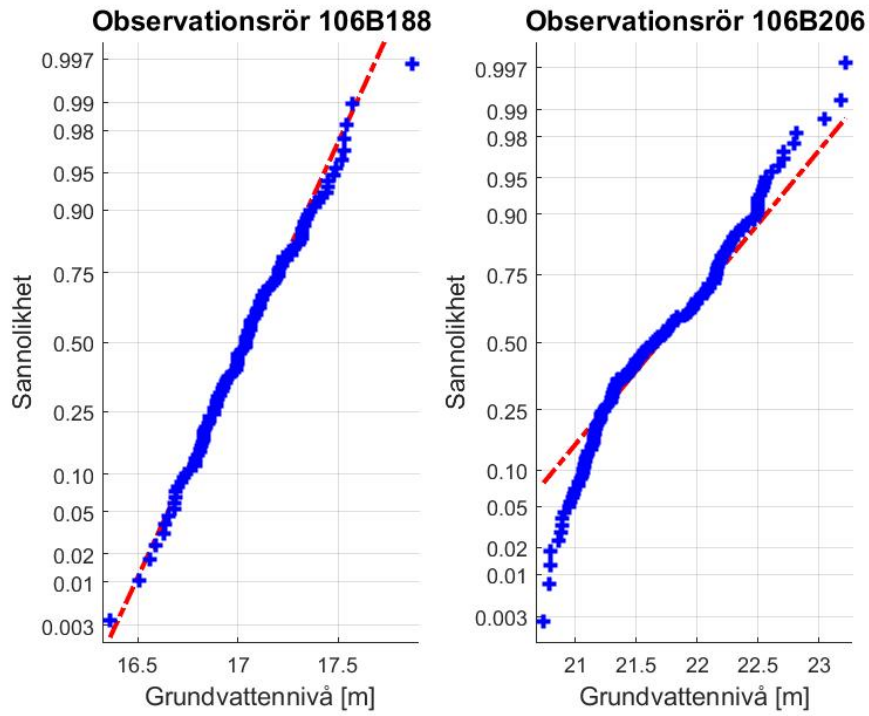


Figur E8: Normalsannolikhetsdiagram för referensrör 56_4. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmäts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger kryssen längst med den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.

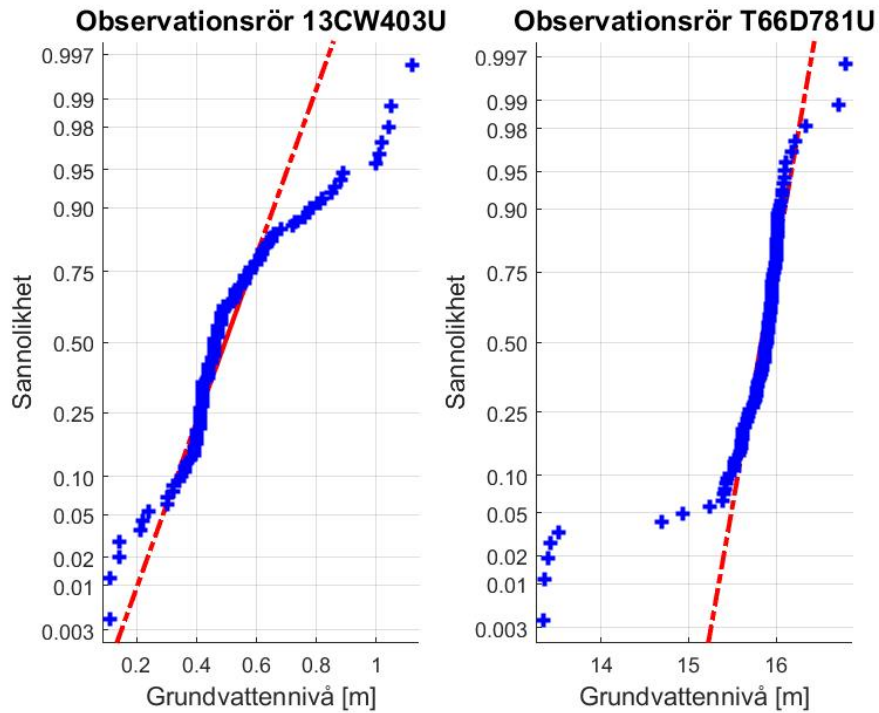
F Normalsannorlikhetsdiagram för observationsrör



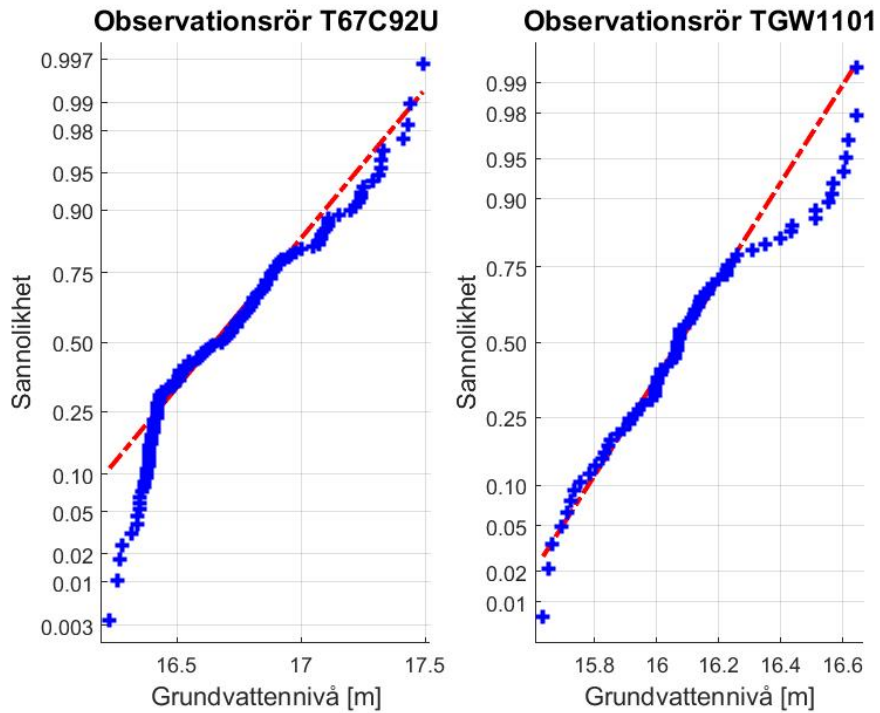
Figur F1: Normalsannorlikhetsdiagram för observationsrör 15X027 och 106B177. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



Figur F2: Normalsannolikhetsdiagram för observationsrör 106B188 och 106B206. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



Figur F3: Normalsannolikhetsdiagram för observationsrör 13CW403U och T66D781U. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmäts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.



Figur F4: Normalsannolikhetsdiagram för observationsrör T67C92U och TGW1101. De blå kryssen motsvarar en maximal grundvattennivå som uppmätts och den streckade linjen i rött motsvarar normalfördelning. Ligger krysset längstmed den röda linjen kan denna antas vara normalfördelad.