W 17 017
Examensarbete 30 hp
September 2017

UPPSALA
UNIVERSITET

Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg

Ellinor Ryd

REFERAT

Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg

Ellinor Ryd

För att kunna uppskatta bergets hydrauliska egenskaper i samband med t.ex. byggnation är det en stor fördel att använda tillgänglig information gällande brunnar. I SGU:s brunnsarkiv finns information om brunnens kapacitet (Q) från kapacitetsbestämning och borrhålslängd. En brunns specifika kapacitet Q/dh, där dh är avsänkningen i borrhålet under kapacitetsbestämning, kan användas för att uppskatta transmissiviteten (T) i berget med hjälp av olika samband. Avsänkningen uppmäts generellt inte under kapacitetsbestämningen utan antas normalt utifrån borrhålslängden på olika sätt.

Syftet med examensarbetet var att belysa och ta fram samband mellan kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning och transmissivitet samt undersöka om detta samband skiljer sig mellan kristallint och sedimentärt berg. För kristallin berggrund undersöktes data från borrningar och provpumpningar från Svensk Kärnbränslehantering AB:s platsundersökningar i Forsmark och Oskarshamn. För det sedimentära berget utfördes 15 provpumpningar på Gotland vilka relaterades till data från borrprotokoll i SGU:s brunnsarkiv. Provpumpningarnas transienta förlopp utvärderades i AQTESOLV genom derivataanalys, en kvalitativ utvärdering av flödesregimer samt en kvantitativ utvärdering av T genom kurvanpassning.

För att undersöka hur avsänkningen under kapacitetsbestämningen lämpligast ansätts bestämdes en effektiv avsänkning, dh_{eff}. Det teoretiska värdet bestämdes utifrån kapacitet från borrning och specifik kapacitet från provpumpning. Linjär regression av log-data användes för att bestämma ett samband mellan transmissivitet utvärderad under transienta förhållanden från provpumpningar och specifik kapacitet från kapacitetsbestämning, inkluderande dh_{eff}. Det framtagna sambandet jämfördes med befintliga, använda samband mellan specifik kapacitet och transmissivitet.

På grund av ett begränsat antal datapunkter avseende det sedimentära berget kunde ingen slutsats dras om huruvida T bör skattas olika för kristallint och sedimentärt berg. Därför togs ett samband fram för all data med ett gemensamt värde för dh_{eff} som bestämdes till 12,37 m. Statistiskt signifikanta resultat för den linjära regressionen erhölls (r^2=0,61 samt p<0,05). Utifrån regressionen bestämdes sambandet $T = 0{,}076 \cdot Q^{1{,}026}$, som vid jämförelse med befintliga samband visade att T i huvudsak underskattats när dessa befintliga samband använts. Spridningen kring samtliga samband var stor vilket visade att enskilda brunnars kapacitet kan avvika stort och att relativt stora säkerhetsmarginaler krävs vid skattning av T utifrån information i SGU:s brunnsarkiv.

Nyckelord: kapacitetsbestämning, SGU:s brunnsarkiv, provpumpning, transmissivitet, specifik kapacitet.
Institutionen för Geovetenskaper, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala. ISSN 1401-5765.

ABSTRACT

Relationship between capacity during drilling and transmissivity in crystalline and sedimentary rock

Ellinor Ryd

Available information about wells provides a great advantage when estimating hydraulic properties in rock during e.g. construction work. In the open well archive of the Geological Survey of Sweden, information such as capacity (Q) from capacity tests during drilling and borehole length can be used for these estimations. Using the specific capacity Q/dh, with dh being the drawdown during capacity tests, the transmissivity of the rock can be approximated using different mathematical relationships. The drawdown is generally not measured during capacity tests, and is therefore assumed in different ways using the borehole length.

In this master thesis project, the purpose was to develop a relationship between capacity from capacity tests during drilling and transmissivity and to determine whether the relationship differs for crystalline and sedimentary rock. For crystalline rock, data from site investigations of the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company was used. For sedimentary rock, 15 pumping tests were carried out in Gotland that were related to data from drilling protocols in the wells archive. An evaluation of transient data of pumping tests was made in AQTESOLV through derivative analysis, evaluation of flow regimes and a quantitative estimation of the transmissivity through curve fitting.

To determine how the drawdown during the capacity test is best assumed an effective drawdown, dh_{eff}, was calculated. The theoretical value was calculated from capacity from drilling and specific capacity from pumping tests. Linear regression of log-data was used to determine a correlation between transmissivity from evaluations of transient pumping test data and specific capacity data, including dh_{eff}. The obtained relationship was compared to existing methods of approximating T from Q/dh.

Due to limited number of data points for the sedimentary rock, no conclusions were drawn whether T should be estimated differently for crystalline and sedimentary rock. A relationship was obtained for all data with the common dh_{eff} of 12.37 m. The linear regression gave statistically significant results (r^2=0.61 and $p<0.05$). From the regression the relationship was determined to $T = 0.076 \cdot Q^{1.026}$. In comparison with existing methods, T was predominately underestimated for the studied existing relationships. The possible deviation for a single well proved to be large for all studied relationships. This means relatively larger safety factors can be required when using information from the wells archive to estimate T.

Keyword: capacity test, wells archive, pumping test, transmissivity, specific capacity.
Department of Earth Sciences, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala. ISSN 1401-5765.

FÖRORD

Detta examensarbete har utförts inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik på Uppsala universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts för Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) i Uppsala och omfattat 30 hp. Handledare för examensarbetet var Calle Hjerne, projektledare vid avdelningen för Mark och grundvatten, SGU. Ämnesgranskare har varit Auli Niemi, professor vid Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, vid Uppsala universitet. Allan Rodhe, professor emeritus vid Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, vid Uppsala universitet har varit examinator. Alla fotografier är tagna av författaren. Figur 5 har tagits fram med tillstånd av Calle Hjerne.

Först och främst vill jag rikta ett stort tack till min handledare Calle Hjerne för initiativet till arbetet samt ovärderlig hjälp och stort engagemang under arbetets gång. Tack till all personal på SGU i Uppsala för vänligt bemötande och behjälplighet. Ett särskilt tack riktas till Peter Dahlqvist och Jonas Gierup, SGU, för hjälp med borrhålen på Gotland samt brunnsprotokoll. Ett tack riktas även till Geosigma i Uppsala för lån av borrhål och utrustning. Till sist vill jag tacka min sambo Jens, familj och vänner för uppmuntran och värdefull stöttning under denna vår.

Uppsala, den 11 juli 2017

Ellinor Ryd

Copyright © Ellinor Ryd och Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten och landskapslära, Uppsala universitet. UPTEC W 17 017, ISSN 1401-5765.
Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala 2017.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg

Ellinor Ryd

För att tidigt kunna undersöka grundvattenförhållanden i berg och uppskatta bergets vattenledande egenskaper i samband med t.ex. byggnation kan tillgänglig information om brunnar användas. I Sveriges Geologiska Undersöknings (SGU) brunnsarkiv finns information om brunnens möjliga vattenuttag, s.k. kapacitet (Q), borrhålslängd och dimensioner tillgänglig. Kapaciteten bestäms direkt vid borrning genom en kapacitetsbestämning och antecknas till borrprotokollet, som inrapporteras till brunnsarkivet. En brunns specifika kapacitet Q/dh, där dh är avsänkningen i borrhålet under kapacitetsbestämningen, kan användas för att approximera transmissiviteten (T) i berget på olika sätt. Transmissiviteten beskriver vattengenomsläppligheten för en viss sektion i berget. Att approximera transmissiviteten utifrån specifik kapacitet är dock inte lika tillförlitligt som att genomföra och utvärdera hydrauliska tester, såsom provpumpningar.

Examensarbetets syfte var att ta fram samband mellan kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning och transmissivitet och undersöka om en skillnad fås för kristallint och sedimentärt berg. För kristallin berggrund undersöktes data från borrningar och provpumpningar från Svensk Kärnbränslehantering AB:s platsundersökningar i Forsmark, Laxemar, Ävrö och Simpevarp. För det sedimentära berget användes data från borrprotokoll i SGU:s brunnsarkiv. Dessutom genomfördes 15 provpumpningar på Gotland som utvärderades med hjälp av programvaran AQTESOLV. I programvaran kunde provpumpningens avsänkning och dess derivata analyseras, flödesregimer bestämmas och en modellanpassning till avsänkningskurvan utföras vilket gav ett värde på transmissiviteten.

På grund av att avsänkningen under kapacitetsbestämningen vanligen inte mäts och rapporteras antas normalt dh utifrån borrhålsdjupet på olika sätt. I studien bestämdes istället ett teoretiskt värde kallat den effektiva avsänkningen, dh_{eff}. Genom att anta att den specifika kapaciteten för ett borrhål var konstant, oavsett storlek på avsänkningen under kapacitetsbestämningen, bestämdes dh_{eff} utifrån kapacitet från borrning och den specifika kapaciteten från provpumpning. För att ta fram ett samband mellan transmissivitet utvärderad från transient data från provpumpningar och specifik kapacitet från kapacitetsbestämning, inkluderande dh_{eff}, användes linjär regression. Det framtagna sambandet jämfördes med befintliga samband mellan specifik kapacitet och transmissivitet, där dh beräknats på olika sätt utifrån borrhålslängd.

På grund av det begränsade antalet datapunkter som användes för det sedimentära berget kunde ingen slutsats dras om huruvida T bör beräknas olika för kristallin och sedimentär berggrund. Därför togs ett samband fram för all data med ett gemensamt värde för dh_{eff} på 12,37 m. Den linjära regressionen gav statistiskt signifikanta resultat

(r^2 på 0,61 och $p<0,05$) och användes för att bestämma sambandet $T = 0{,}076 \cdot Q^{1{,}026}$. Sambandet gav en bättre uppskattning av T jämfört med befintliga samband som huvudsakligen underskattade transmissiviteten. För alla samband fanns dock en stor spridning, som visar att större säkerhetsmarginaler bör användas när transmissivitet approximeras utifrån kapacitet från borrning. Om endast ett fåtal brunnar i SGU:s brunnsarkiv används för att ta fram T bör hänsyn tas till att en enskild brunns kapacitet kan avvika stort från det framtagna sambandet.

DEFINITIONER

Grundvattennivå	Översta gränsen för grundvattnet där det hydrostatiska trycket är lika med atmosfärstrycket.
Hydrostatiskt tryck	Trycket i en viss punkt från ovanliggande vattenpelares tyngd.
Hydraulisk konduktivitet	Mått på hur bra ett medium såsom jord eller berg leder vatten. Betecknas K (m/s).
Kapacitet	Benämns även brunnskapacitet. I denna rapport syftar kapaciteten, Q (m^3/s), på det vattenuttag som momentant är möjligt ur en brunn vid en kapacitetsbestämning.
Specifik kapacitet	Bestäms som $q = \frac{Q}{dh}$ (m^2/s), där kapaciteten i berget är dividerad med avsänkningen, dh.
Totaltryck	Det sammanlagda trycket av lufttryck och hydrostatiskt tryck.
Transmissivitet	Mått på vattenledningsförmågan för en viss sektion i mediet. Betecknas T (m^2/s).

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Referat I
Abstract II
Förord III
Populärvetenskaplig sammanfattning IV
Definitioner VI
Innehållsförteckning VII
1 Inledning 1
2 Syfte och frågeställningar 2
2.1 Avgränsningar 2
3 Teori 2
3.1 Grundvatten 2
3.1.1 Grundvattenflöde i kristallin och sedimentär berggrund 3
3.2 Borrning av brunnar 5
3.2.1 SGU:s brunnsarkiv 6
3.2.2 Platsundersökningar i Forsmark och Oskarshamn 6
3.2.3 Variation i hydraulisk konduktivitet med brunnsdjup 7
3.3 Hydrauliska tester i berg 7
3.3.1 Provpumpning 9
3.3.2 Kapacitetsbestämning vid borrning 10
3.4 Utvärdering av provpumpningar 10
3.4.1 Utvärdering av provpumpning under stationära förhållanden 11
3.4.2 Utvärdering av provpumpning under transienta förhållanden 12
3.5 Utvärdering av kapacitetsbestämning vid borrning 14
3.5.1 Avsänkning under kapacitetsbestämning 15
3.5.2 Samband mellan specifik kapacitet och transmissivitet 15
3.6 Jämförelse av data från SGU:s brunnsarkiv och SKB:s platsundersökningar 17
3.7 AQTESOLV, pro., version 4.5 17
4 Metod 19
4.1 Analys av effektiv avsänkning vid kapacitetsbestämning 19
4.2 Framtagning av samband mellan specifik kapacitet och transmissivitet 20
4.3 Analys i kristallint berg 22
4.3.1 Databearbetning 23

4.4 Analys i sedimentärt berg 24
4.4.1 Utförande av provpumpningar 24
4.4.2 Utvärdering av provpumpningar under transienta förhållanden 29
4.4.3 Utvärdering av provpumpningar under stationära förhållanden 31
5 Resultat 32
5.1 Provpumpningar i sedimentärt berg 32
5.2 Analys av effektiv avsänkning vid kapacitetsbestämning 35
5.3 Framtagning av samband mellan kapacitet och transmissivitet 39
6 Diskussion 43
6.1 Provpumpningar i sedimentärt berg 43
6.2 Analys av effektiv avsänkning 45
6.3 Framtagning av samband mellan kapacitet och transmissivitet 47
7 Slutsats 50
8 Referenser 51
Appendix A – Data för analys i kristallint berg 56
Data från borrning 56
Data från provpumpningar 58
Appendix B – Data för analys i sedimentärt berg 60
Data från enhålsprovpumpningar och AQTESOLV 60
Appendix C – Provpumpningar på Gotland 62
Utrustning 62
Utvärdering av provpumpningar på Gotland 63
Appendix D – Effektiv avsänkning som funktion av brunnsdjup 92

1 INLEDNING

Grundvattenförhållanden i mark och berg undersöks t.ex. i samband med exploatering för att i största möjliga mån undvika sättningar eller andra skador på miljö och befintlig bebyggelse. Med hjälp av hydrauliska undersökningar såsom provpumpningar kan egenskaper hos akviferen i form av genomsläpplighet och magasineringsförmåga bestämmas. Ett sätt att kvantifiera berggrundens genomsläpplighet är att fastställa bergets transmissivitet T, som är ett mått på grundvattenflödet genom en viss sektion (Carlsson & Gustafson, 1991).

Vid en provpumpning pumpas vatten ur ett borrhål under kontrollerade förhållanden. Antingen hålls pumphastigheten eller avsänkningen, dvs. hur grundvattennivån sänks i hålet, konstant samtidigt som vattentrycket mäts (Carlsson & Gustafson, 1991). Transmissiviteten kan därefter bestämmas genom utvärderingar av data för transienta eller stationära förlopp. En utvärdering av ett transient förlopp utförs genom att tryckförändringen studeras över tid medan en utvärdering av ett stationärt förlopp antar stationära förhållanden (Gustafson, 2009).

I inledande undersökningar kan det vara nödvändigt att approximera bergets hydrauliska egenskaper innan vidare hydrogeologiska mätningar utförs (Carlsson & Gustafson, 1991). Med hjälp av befintliga borrhål kan information om grundvattenflödet i berggrunden fås i ett tidigt stadium. Data som i allmänhet är tillgänglig i Sveriges Geologiska Undersöknings (SGU:s) brunnsarkiv från borrprotokoll är brunnens kapacitet samt borrhålets dimensioner. Kapaciteten (Q) är det möjliga vattenuttaget ur borrhålet, som bestäms direkt vid borrning genom en s.k. kapacitetsbestämning. Den vanligaste metoden för kapacitetsbestämning är genom tryckblåsning, där vatten trycks upp med hjälp av luft ur borrhålet och vattenflödet kan mätas. Tryckblåsningen utförs med hammarutrustningen som används vid borrning. Med hjälp av brunnens kapacitet och avsänkningen av grundvattennivån (dh) under kapacitetsbestämningen bestäms den specifika kapaciteten (q) i borrhålet med sambandet $q = Q/dh$ (Gustafson, 2009). Den specifika kapaciteten kan därefter approximeras som bergets transmissivitet genom olika samband. Tidigare studier har visat att approximationen fungerar väl för regionala studier där transmissiviteten tillåts variera en storleksordning (Wladis & Gustafson, 1999).

För att kapaciteten från borrning ska kunna användas för att skatta transmissivitet i berg krävs i allmänhet information om storleken på den avsänkning som gällt under kapacitetsbestämningen. I borrprotokollen i SGU:s brunnsarkiv finns sällan information om avsänkningen (Berggren, 1998), som därför antas utifrån borrhålsdjupet på olika sätt. Det ger osäkerheter kring hur specifik kapacitet från borrning och transmissiviteten relateras och hur sambanden används. Dessutom väcks frågor om ett samband skiljer sig åt för Sveriges kristallina och sedimentära berggrund. På grund av dessa osäkerheter finns det ett behov att utreda vilken metod för framtagning av transmissivitet och hydraulisk konduktivitet i berg utifrån användning av denna approximativa metod som är mest lämpad.

2 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet med examensarbetet var att ta fram och belysa samband mellan kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg. Arbetet behandlade hur bergets vattengenomsläpplighet beräknas idag från data i SGU:s brunnsarkiv och om framtagna samband styrker dessa metoder. För att uppfylla syftet valdes följande frågeställningar:

- Vilken metod är mest lämpad för att beräkna transmissiviteten utifrån information i SGU:s brunnsarkiv? Finns det någon skillnad gällande metod för kristallint och sedimentärt berg?
- Vilka faktorer påverkar sambandet mellan utvärderad transmissivitet från provpumpning och kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning i kristallint och sedimentärt berg?

2.1 AVGRÄNSNINGAR

I examensarbetet har vissa avgränsningar gjorts. Studien har inte innefattat någon närmare undersökning av bergarter vid de studerade borrhålens platser utan endast utgått från bergartskategorierna kristallina respektive sedimentära bergarter. Examensarbetet har behandlat provpumpningar i enskilda borrhål och inte interferenstester där observationsrör används under testen.

3 TEORI

3.1 GRUNDVATTEN

Grundvatten definieras som det vatten som fyller hålrum, i form av porer och sprickor, i jord eller berg som har ett hydrostatiskt tryck som är lika högt eller högre än atmosfärstrycket. Utvinning av grundvatten sker i geologiska bildningar eller lager, kallade akviferer, som är tillräckligt genomsläppliga för att möjligheter till strömning eller magasinering av vatten finns. En akvifer i jord eller berg kan vara öppen, läckande eller sluten. En öppen akvifer har grundvattenytan som översta gräns medan en sluten akvifer begränsas av lågpermeabla eller impermeabla skikt. Läckande akviferer står i kontakt med lågpermeabla skikt där ett läckage av vatten till eller ifrån akviferen sker (Carlsson & Gustafson, 1991).

I en öppen akvifer är grundvattenytan i direkt kontakt med atmosfären, och har ett lika högt hydrostatiskt tryck som atmosfären. En sluten akvifers grundvattenyta begränsas av ovanliggande täta lager och har därför högre tryck än atmosfärstrycket. För en brunn som borras genom en sluten akvifer kommer den tryckyta, kallad potentiometrisk grundvattenyta, som vattnet stiger till vara högre än det ogenomsläppliga lagrets nedersta gräns. I vissa fall kan tryckytan överstiga markytan, och grundvattnet benämns då som artesiskt (Knutsson & Morfeldt, 2002).

För att beskriva ett laminärt flöde genom ett poröst medium används den grundläggande ekvationen Darcys lag. Darcys lag (ekvation 1) beskriver hur flödet (Q) genom en viss

tvärsnittsarea (A) beror på den hydrauliska konduktiviteten (K) och den hydrauliska gradienten (dh/dl) (Domenico & Schwartz, 1998).

$$\frac{Q}{A} = -K \cdot \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

Q – vattenflöde (m^3/s), A – tvärsnittsarea (m^2), K – hydraulisk konduktivitet (m/s), $\frac{dh}{dl}$ – hydraulisk gradient (m/m).

Den hydrauliska gradienten beskriver förändringen av grundvattennivåns vattenpotential, eller trycknivå, med längden av flödessträckan. Den hydrauliska konduktiviteten är ett mått på hur genomsläppligt mediet är, och beror av både egenskaper hos mediet och vattnet. Genomsläppligheten varierar stort mellan och inom olika typer av bergarter (Domenico & Schwartz, 1998). Transmissivitet, T (m^2/s), är ett mått på hur genomsläpplig akviferen är över en viss mättad mäktighet, b (m), och definieras enligt ekvation (2) (Kruseman & de Ridder, 1991).

$$T = K \cdot b \quad (2)$$

T – transmissivitet (m^2/s), K – hydraulisk konduktivitet (m/s), b - mättad mäktighet (m).

För att tillämpa Darcys lag i beräkningar innehållande grundvattenströmning i berg antas berget vara ett poröst och homogent medium, ett kontinuum. Genom tillämpningen studeras vattenflödet inte i enskilda sprickor utan genom bergmassan i stort (Domenico & Schwartz, 1998). På så sätt blir den framtagna hydrauliska konduktiviteten ett effektivt värde som beskriver sprickornas generella egenskaper över en större volym. Antagandet om berget som ett kontinuum är vanligtvis nödvändigt vid utvärdering av hydrauliska tester, som utförs med syftet att bestämma olika egenskaper hos berget (Gustafson, 2009).

3.1.1 Grundvattenflöde i kristallin och sedimentär berggrund

Grundvattenflöde i bergakviferer skiljer sig åt från flödet i jordakviferer. I det impermeabla berget är det sprickor och sprickzoner som möjliggör grundvattenströmning. Det huvudsakliga vattenflödet styrs genom de sprickor som är sammanhängande i den riktning där motståndet är minst. Eftersom berget med dess spricksystem är ett heterogent medium är den hydrauliska konduktiviteten vanligtvis anisotrop, dvs. av varierande storlek i olika riktningar (Domenico & Schwartz, 1998).

Spricksystemen i berg har varierande ursprung. Storskaliga spricksystem skapas av spänningar i berget vid bergartens eller bergskedjans bildande på grund av skjuv- och veckningsprocesser i jordskorpan. Spänningarna har på så sätt sitt ursprung i de plattektoniska krafterna. Sprickor uppkommer även i samband med avlastning och glaciation samt genom erosion och vittring i ytberget (Gustafson, 2009).

Spricksystemens kontinuitet är av avgörande betydelse för hur vattnet flödar. Huvudsakligen strömmar de största vattenmängderna i ett fåtal av sprickorna i berget. I sprickor och stagnanta porer som är avskärmade från omgivande vattenledande sprickor omsätts vattnet genom diffusion (Gustafson, 2009). Egenskaper hos sprickorna som

påverkar flödet genom berget är, förutom hur sammanhängande de är, ytornas råhet och utseende samt sprickornas längd, öppenhet och grad av mineralisering (Olofsson m.fl., 2001).

Sveriges berggrund består av kristallint urberg, sedimentär berggrund och fjällberggrunden. Urberget underlagrar både de sedimentära bergarterna, som t.ex. finns på Gotland och Öland, och fjällberggrunden (SGU, u.å.). Strukturen hos det kristallina och sedimentära berget skiljer sig åt. Det kristallina berget består av bergarter såsom granit och gnejs där sprickigheten och storleken på de sammanhängande sprickorna styr grundvattenflödet i det annars hårda och förhållandevis täta berget (SGU, 2016). Flödesmönstret är heterogent vilket grundar sig i att det finns en stor variation i sprickornas orientering, frekvens och utseende (Olofsson m.fl., 2001). Sedimentärt berg kan istället både vara sprickigt och poröst. T.ex. är sandsten en porös bergart, och i vissa fall även kalksten. Detta ger vissa likheter med hur grundvatten beter sig i jord genom att mer vatten kan hållas i bergets porer (SGU, 2016). Med denna skillnad i struktur har kristallint och sedimentärt berg varierande förutsättningar för grundvattenströmning. Variationen inom kristallina bergarter är generellt sett större än för sedimentära bergarter (Domenico & Schwartz, 1998). Dock kan variationen av den hydrauliska konduktiviteten vara större inom en och samma bergart än mellan olika typer av bergartskategorier (Follin m.fl., 1998). Den generellt sett högre hydrauliska konduktiviteten hos sedimentära bergarter möjliggör ett större vattenflöde jämfört med kristallin berggrund. Det innebär att om en akvifer i sedimentärt berg används för vattenuttag finns en större möjlighet att påträffa en tillräcklig kapacitet vid ytligare djup (Berggren, 1998). Bergartens kemiska sammansättning samt struktur och textur påverkar vilken uttagskapacitet som finns i berget. Sprickstrukturen och därmed flödesmönstret i berget kan ändras genom att äldre sprickor regenereras och spricker upp på nytt (Olofsson m.fl., 2001).

I sedimentär berggrund är det vanligt att olika sorters bergarter lagras ovanpå varandra i skikt vilket påverkar hur sprickorna i berget är orienterade (SGU, 2016). Den sedimentära berggrunden karaktäriseras av mer eller mindre jämna skiktytor vilket bidrar till varierande vattenledningsförmågor. Vanligtvis leder skiktytorna sällan vatten, men med en större ojämnhet hos skikten ökar genomsläppligheten i berget (Knutsson & Morfeldt, 2002). Ett exempel på skiktningen visas i Figur 1, med flöde från sedimentär berggrund i Visby, Gotland. Berggrunden på Gotland bildades under tidsperioden Silur för mellan 428 och 418 miljoner år sedan och består av bergarter såsom kalksten och märgel (Dahlqvist m.fl., 2015). Märgel är liksom kalksten en

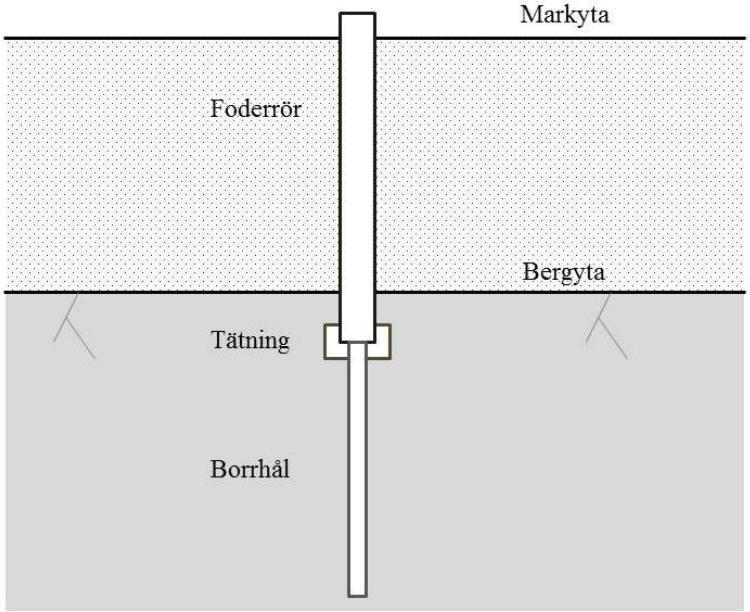
Figur 1 Grundvattenflöde från sedimentär berggrund i Visby, Gotland. Berggrunden är skiktad med grundvattenflöde ur berget.

sedimentär bergart, men innehåller mer lera och ger i allmänhet små möjligheter till grundvattenuttag (Knutsson & Morfeldt, 2002). Den sprickrika och delvis porösa sedimentära berggrunden underlagras av kristallint urberg på ett varierande djup av mellan 500 och 750 m. Det gotländska berget har varierande hydrauliska egenskaper och har generellt en relativt låg magasinering av grundvatten. Grundvattnet finns framförallt i bergets sprickor och porer då öns jordlager mestadels har liten mäktighet. Förekomsten kan skilja sig avsevärt i både horisontell och vertikal led på grund av heterogeniteten i berget. Grundvattenmagasin kan vara avskärmade genom skikt- och sprickstrukturer samt förekomst av mindre genomsläppliga bergarter. I områden där karstsystem förekommer kan istället transportvägar för grundvattnet bildas, vilket kan ha stor vikt för flödet. Karst syftar på bildningar som uppkommer genom kemisk vittring av kalkstensberggrunden där sprickor vidgas till kanaler eller till och med grottor (Dahlqvist m.fl., 2015).

3.2 BORRNING AV BRUNNAR

Syftet med att borra en brunn kan vara att försörja ett enskilt eller flera hushåll med vatten eller att utvinna energi i form av värme. I Sverige finns fyra sorters brunnar – bergborrade brunnar, filterbrunnar, grävda brunnar och spetsbrunnar. I denna rapport behandlas endast bergborrade brunnar, som är vanligast (SGU, 2016).

För att anlägga en brunn i berg borras inledningsvis hålet ned till berg genom jordlagren samtidigt som foderrör i t.ex. stål sätts på plats. Därefter tätas utrymmet mellan foderrör och det fasta berget med cement för att undvika inströmning av mer ytligt liggande grundvatten samt förhindra jord från att komma in i borrhålet. Beroende på syftet med brunnen borras därefter brunnen ned i berget till önskat djup (Figur 2). För en brunn där syftet är att utvinna energi i form av värme borras brunnen till ett visst dimensionerande djup. Vid vattenuttag borras brunnen till önskad vattenmängd fås (SGU, 2016). Även risken för saltvatteninträngning kan styra hur djupt borrningen sker (Berggren, 1998).



Figur 2 Schematisk figur över en brunn borrad i berg. Ej skalenlig.

Bergborrade brunnar anläggs i allmänhet med tryckluftsdriven sänkhammarutrustning där hammarborren både roterar och slår (SGU, 2016). Vid borrningen appliceras sänkhammarborrens kraft i borrhålet till skillnad mot vid topphammarborrning där den appliceras ovanför markytan (Prevent Arbetsmiljö, 2008). Under hammarborrningen blåses vatten och borrkax upp med luftströmmen ur borrhålet. Borrning med hammarborr är lämplig för borrhål som ska utvärderas genom hydrauliska tester som syftar till att bestämma bergets vattenförande egenskaper. Detta eftersom en större borrhålsdiameter på 115-165 mm skapas vilket möjliggör användning av pumpar med större kapacitet. En annan typ av borrning är kärnborrning där kärnprover av berget tas under borrningen (Gustafson, 2009).

Det höga trycket under själva borrningen kan resultera i en viss igensättning av sprickor i berget närmast borrhålet vilket kan försämra genomsläppligheten. Detta kan åtgärdas efter avslutad borrning genom tryckblåsning (*eng. air lift pumping*) (Berggren, 1998).

Om vattenuttaget är för lågt kan en tryckning utföras där borrhålet högtrycksspolas. Efter att hålet borrats klart delas det upp med hjälp av en manschett och vatten spolas under manschetten med en kraft på mellan 100 och 200 bar. Högtrycksspolningen utförs normalt för att öka vattenuttaget genom att sprickor kan öppnas upp ytterligare. Utöver högtrycksspolning kan spräckning av berget förekomma för att öka vattenuttaget (SGU, 2016).

3.2.1 SGU:s brunnsarkiv

Idag ansvarar myndigheten Sveriges Geologiska undersökning (SGU) för miljökvalitetsmålet *Grundvatten av god kvalitet*. En del av SGU:s verksamhet innebär att sammanställa och lagra information som kan vara väsentlig för SGU, allmänheten och näringsliv vid planering av brunnar eller utförande av hydrogeologiska undersökningar. SGU:s brunnsarkiv är ett arkiv där information samlas om nya vatten- och energibrunnar som borras, dit brunnsborraren har en anmälningsplikt enligt lagen om anläggning av vattenbrunnar och energibrunnar (SFS 1975:424 och SFS 1985:245). Informationen som rapporteras in till arkivet innefattar bl. a. kapacitet, lokalisering av brunn samt när och till vilket djup brunnen borrades. Mellan 5000 och 10 000 dricksvattenbrunnar borras varje år och tillkommer till registret (SGU, 2016). Totalt innehåller arkivet ca 550 000 uppgifter om vatten- och energibrunnar (SGU, 2015).

I syfte att underlätta vid planering av byggnation samt nyttjande och skydd av grundvattentäkter gav SGU tidigare ut en serie kartor kallad Ah-serien. I kartserien har data från brunnsarkivet använts för att bl. a. beräkna regionala värden för hydraulisk konduktivitet och transmissivitet (Pousette m.fl., 2000).

3.2.2 Platsundersökningar i Forsmark och Oskarshamn

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har som uppdrag att ta hand om använt kärnbränsle från Sveriges kärnkraft för att säkra människors hälsa och miljön på lång sikt. Genom SKB:s verksamhet har forskning och undersökningar bedrivits sedan 1970-talet där bl. a. lokalisering av slutförvar av använt kärnbränsle har utretts.

Platsundersökningar har genomförts i Östhammar och Oskarshamn vilka resulterade i att Forsmark valdes som slutgiltig plats för slutförvaret år 2009 (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015). I och med platsundersökningarna har SKB unik information över geohydrologin och sprickegenskaper hos berggrunden i dessa områden (Wahlgren m.fl., 2015).

Innan lokaliseringen av Forsmark undersöktes flera platser som potentiella placeringar för slutförvaret av använt kärnbränsle. Vid undersökningarna lades bl. a. fokus på den kemiska sammansättningen av grundvattnet, ythydrologi, sprickmineralogi och bergets genomsläpplighet. Hydrauliska enhålstester har utförts i hammarborrhål och kärnborrhål i samband med de grundliga platsundersökningarna som gjordes i Forsmark och i Äspö, Laxemar och Simpevarp utanför Oskarshamn (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010). Enligt utförda undersökningar finns skillnader hos grundvattenföringen i de olika områdena. Små sprickzoner och branta sprickor ger upphov till ett anisotropt flöde som kännetecknar området kring Äspö och Simpevarp. I Forsmark sker det dominerande vattenflödet i horisontell led i sprickzoner vid bergytan (Wahlgren m.fl., 2015).

3.2.3 Variation i hydraulisk konduktivitet med brunnsdjup

Det finns studier om hur den hydrauliska konduktiviteten i berget förändras med djup. I en statistisk studie av Berggren (1998) studerades vilka utav faktorerna typ av berg, typ av kapacitetsbestämning, markanvändning och brunnsdjup som bäst förklarar variationen i hydraulisk konduktivitet. Resultatet var att brunnsdjupet kan förklara variationen bäst. Typ av berggrund, urberg eller sedimentär berggrund, beskrev en begränsad del av variationen i den hydrauliska konduktiviteten (Berggren, 1998).

I studien framlades att den hydrauliska konduktiviteten minskar med ökat brunnsdjup. Berggren beskriver att minskningen i hydraulisk konduktivitet med ökat brunnsdjup dels beror på att frekvensen av frakturer i berget vanligtvis är högre närmast ytan av berget på grund av t.ex. glaciärer som genererat skjuvspänningar i berget genom tryck och avlastning. Eftersom SGU:s brunnsdata, som användes i studien, utgår från beräkningar med ekvationer som är baserade på brunnsdjupet är det möjligt att dessa ökar djupberoendet. Berggren menade på så sätt att när antaganden görs gällande avsänkningen överdrivs sambandet mellan genomsläppligheten i berget och brunnens djup (Berggren, 1998). Den huvudsakliga anledningen till varför den hydrauliska konduktiviteten normalt minskar med ökat djup i berget är ökade bergspänningar (Olofsson m.fl., 2001). Enligt studier utförda med data ifrån Simpevarpsområdet och med analys av data från SGU:s brunnsarkiv påvisades att den hydrauliska konduktiviteten avtog med djupet ned till ett djup på 100 meter där sambandet planade ut (Follin m.fl., 1998).

3.3 HYDRAULISKA TESTER I BERG

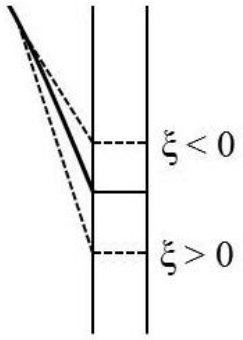
Hydrogeologiska mätningar i form av hydrauliska tester används för att undersöka bergets egenskaper genom att på ett kontrollerat sätt injektera eller pumpa bort vatten och mäta responsen i ett eller flera borrhål (Carlsson & Gustafson, 1991). Mätningarna kan användas för att säkerställa hållbara vattenuttag, analysera vilka risker som kan

uppkomma vid utsläpp av föroreningar eller som indata till grundvattenmodeller. Vid borrning eller hydrauliska tester utförs en störning av rådande berg- och grundvattenförhållanden. Borrningen kan öppna nya strömningsvägar genom att länka samman sprickor i olika skikt medan pumpning inducerar en strömning genom berget (Olofsson m.fl., 2001).

Grundläggande antaganden som ofta görs vid utvärdering och analys av hydrauliska tester är att berget ses som ett kontinuum och att strömningen genom akviferen antas vara laminär. Vid utvärdering av hydrauliska tester finns metoder där flöde och tryck antas vara stationära eller transienta, dvs. ändras med tiden. Med hjälp av hydrauliska tester i en eller flera brunnar kan bergets genomsläpplighet bestämmas i form av hydraulisk konduktivitet eller transmissivitet vilket vanligtvis är de parametrar som primärt bestäms (Gustafson, 2009). Förutom hydraulisk konduktivitet och transmissivitet är magasinskoefficienten, S (-), och därmed den hydrauliska diffusiviteten, T/S (m^2/s), möjliga att bestämma genom hydrauliska tester. Magasinskoefficienten beskriver mängden vatten som kan frigöras vid en förändring i trycknivån hos grundvattnet. Beroende på om akviferen är sluten eller öppen kommer olika stor mängd vatten kunna frigöras. I en sluten akvifer beror den hydrauliska diffusiviteten av hur vattnet och det fasta kornskelettets volym förändras (Carlsson & Gustafson, 1991). När provpumpningar utförs är syftet ofta att få en rimlig skattning av transmissiviteten, vilket kan göras med och utan användning av observationsbrunnar. Vid skattning av magasinskoefficienten är det däremot mindre lämpligt att använda enhålsprovpumpningar på grund av påtagliga skin-effekter (se nedan) (Renard m.fl., 2009). Följaktligen blir T/S svår att bestämma utan användning av observationsrör.

Under ett hydrauliskt test såsom en provpumpning kommer en avsänkning av grundvattennivån i borrhålet ske när vatten pumpas bort. I berget skapas en sänkningstratt som speglar den tryckförlust som skillnaden i grundvattennivån innebär. Den totala avsänkningen beror av brunnsförlust (*eng. well loss*) och formationsförlust (*eng. formation loss*). Formationsförlusten beror av strömningen i akviferen skapad av tryckförlusten vid pumpning (Carlsson & Gustafson, 1991). Brunnsförlusten består av en linjär och en icke-linjär del. Den icke-linjära delen beror på skillnaden i friktion för strömningen närmast brunnen, där flödet vanligtvis är turbulent, och det turbulenta flödet i brunnen. Den linjära delen av brunnsförlusten beskrivs av den s.k. skin-effekten (Kruseman & de Ridder, 1991). Skin-effekten beskriver hur direkt den hydrauliska kommunikationen mellan berg och borrhål sker relativt den hydrauliska kommunikationen i berget i övrigt. Faktorer som påverkar skin-effekten kan vara igensättningar i borrhålet samt brunnens utformning om den inte genomtränger hela akviferen (Carlsson & Gustafson, 1991). Skin-faktorn kan också användas vid utvärdering för att inkludera icke-linjära effekter vid pumpning med konstant flöde som inte beaktas på annat sätt.

Igensättningar som bildas med tiden i borrhålet som en tunn hud och ökar motståndet mot inflödet lokalt närmast borrhålet gör att skin-faktorn, ξ, blir positiv. Skin-faktorn kan även ha ett negativt värde, t.ex. om en konduktiv spricka skär genom borrhålet som speglar en hög lokal genomsläpplighet. Vid analys av avsänkningskurvan för t.ex. en provpumpning ger en positiv skin-faktor endast ett tillägg till avsänkningen (Figur 3), och påverkar inte lutningen hos avsänkningskurvan (Gustafson, 2009). Ett sätt att tolka skin-effekter vid analys av provpumpningar är att använda en effektiv brunnsradie. Med ett negativt värde på skin är den effektiva brunnsradien större än den verkliga (Agarwal m.fl., 1970).



Figur 3 Konceptuell bild över skillnad i avsänkning och sänkningstratt för ett borrhål med positiv respektive negativ skin-faktor. Ej skalenlig.

Det finns utöver nämnda faktorer en påverkan på avsänkningen från skillnader i lufttryck, tidvatten, havsnivåförändringar samt långsiktiga trender hos grundvattennivån i området. Vid korta pumptider kan dessa faktorer anses vara små eller försumbara (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016), speciellt om avsänkningen är betydande.

3.3.1 Provpumpning

Provpumpning är en tillförlitlig metod för att bestämma hydrauliska egenskaper i en akvifer eller brunn, t.ex. hur genomsläppligt ett berg är. Med hjälp av en pump pumpas vatten ut från borrhål på ett kontrollerat sätt samtidigt som avsänkningen hos grundvattenytan mäts. Ofta eftersträvas ett konstant flöde i ett eller flera steg (och därmed varierande avsänkning) vid provpumpning, men det går också att utvärdera en konstant avsänkning där flödet varieras. Antingen utförs den hydrauliska mätningen i ett och samma borrhål, ett s.k. enhålstest, eller så kan avsänkningen dessutom mätas i omkringliggande observationsrör, varvid testet kallas interferenstest (Gustafson, 2009). Avsänkningen av grundvattenytan i borrhålet motsvarar den skillnad i trycknivå som åstadkoms vid provpumpningen. De hydrauliska förhållandena kan antingen antas vara stationära eller transienta. Mättiden för provpumpningar kan variera beroende på om testet utförs som korttids-, långtids- eller stegprovpumpning (Carlsson & Gustafson, 1991). Långtidsprovpumpningar är i allmänhet längre än sex månader medan korttidsprovpumpningar kan vara i några timmar eller något dygn (Knutsson & Morfeldt, 2002).

Den största förändringen vid provpumpning sker inledningsvis (Gustafson, 2009). Därför måste mätningarna av grundvattnets trycknivå ske mer frekvent initialt för att få med de snabba förändringar som sker vid avsänkningens början. Om pumpflödet inte är konstant eller avbryts kan det vara skäligt att utföra en mätning av återhämtningskurvan där grundvattnet återgår till det initiala tillståndet (Kruseman & de Ridder, 1991).

3.3.2 Kapacitetsbestämning vid borrning

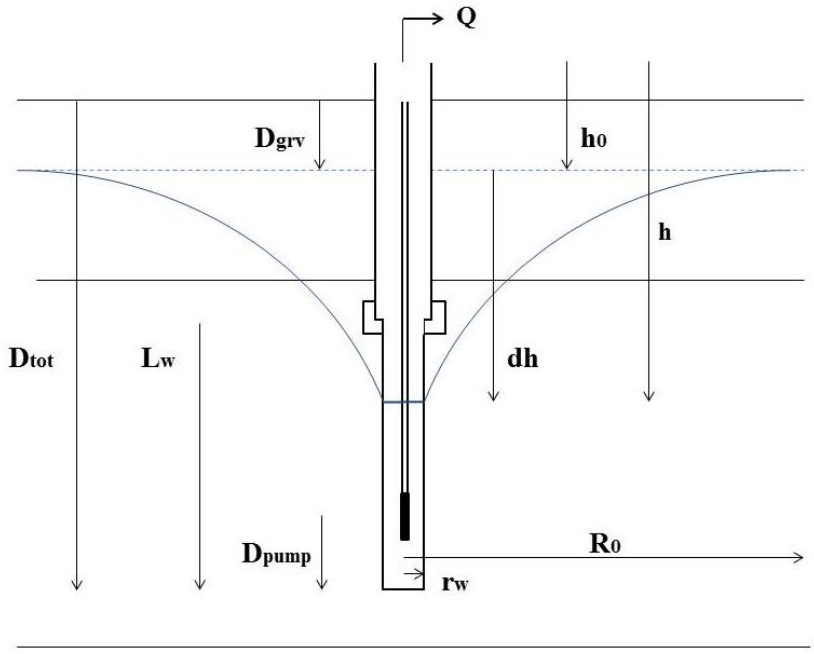
När brunnar borras i berg med syftet att ta ut en viss mängd vatten bestäms det möjliga uttaget genom en kapacitetsbestämning direkt vid borrning. En kapacitetsbestämning kan ske på olika sätt genom t.ex. tryckblåsning, provpumpning eller genom att mäta återhämtningen (s.k. flottörmätning) i ett borrhål (Berggren, 1998). Det vanligaste sättet är att kapacitetsbestämningen utförs direkt med borrhammaren genom en blåsning med tryckluft som blåser upp vatten ut borrhålet varefter mängden kan mätas, så kallad mammutpumpning (Gustafson, 2009). Vattnet som blåses upp mäts genom att fylla en hink med vatten och mäta tiden det tar att nå en viss volym. Mätningen upprepas under borrningens gång, och vid uppnådd önskad kapacitet kan borrningen avslutas (Berggren, 1998). Ett problem vid dessa mätningar kan vara att brunnen inte töms på vatten vid tryckblåsningen på grund av en för stor mängd vatten, vilket påverkar data för mätningar i berg med högre kapacitet (Gustafson, 2009). Vid borrning i samband med SKB:s platsundersökningar uppges den maximala avsänkningen i berget närmast borrhålet ha varit ca 40-60 m under den ursprungliga grundvattennivån vid tryckblåsning. Detta både vid kärn- och hammarborrning, trots att kärnborrhålen kan anläggas till 1000 m djup (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000).

Flödet som uppmäts vid kapacitetsbestämningen benämns brunnens kapacitet, Q. Vid en låg kapacitet i en lågkonduktiv bergmassa måste brunnen borras djupare än för brunnar med högre kapacitet om syftet är att ett visst vattenflöde ska erhållas (Gustafson, 2009). I bergets ytligaste delar är strukturen i störst utsträckning påverkad i form av sprickor. Därför krävs vanligtvis inte ett större brunnsdjup än ca 100 m (Wahlgren m.fl., 2015).

Kapaciteten hos en brunn som krävs för ett enskilt hushåll är ca 100 liter/tim. För brunnar i kristallint berg varierar kapaciteten oftast mellan 100-1000 liter/tim. Ett högt vattenuttag fås om en sprickzon med god vattenledningsförmåga påträffas. I sedimentära bergarter är kapaciteten generellt högre, och kan vara större än 10 000 liter/tim (SGU, 2016).

3.4 UTVÄRDERING AV PROVPUMPNINGAR

Beroende på vilka antaganden som görs i samband med hydrauliska tester sker utvärderingen av provpumpningar på olika sätt. Bergets egenskaper och typ av hydrauliskt test avgör hur analysen lämpligast sker. I följande avsnitt används parametrar som visas schematiskt under pumpning ur ett borrhål i Figur 4.



Figur 4 Schematisk skiss över parametrar, ej skalenlig. Q är pumpflöde (m^3/s). D_{grv} är avståndet från markyta till grundvattennivå innan pumpning. D_{pump} är avståndet mellan mitten av pumpen och borrhålets botten. D_{tot} är brunnsdjupet från markyta. Avsänkningen beskrivs av dh, som är skillnaden mellan initial grundvattennivå, h_0, och nuvarande, h. L_w är den öppna sektionen, R_0 är influensradien och r_w är borrhålsradien.

3.4.1 Utvärdering av provpumpning under stationära förhållanden

För stationära förhållanden kan data från provpumpningar analyseras med t.ex. Thiems eller Moyes ekvation. Thiems brunnsekvation (ekvation 3) relaterar brunnskapaciteten med transmissiviteten i en ideal, sluten akvifer (Gustafson, 2009).

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot dh} \cdot \ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) \qquad (3)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – pumpflöde (m^3/s), dh – avsänkning (m), R_0- influensradie (m), r_w- borrhålsradie (m).

Thiems ekvation kan användas för enhålsprovpumpningar genom ett förenklat uttryck (ekvation 4) för en ideal, sluten akvifer. Denna metod är approximativ och ger sämre resultat ifall brunnsförlusten (*eng. well loss*) eller turbulent flöde i närheten av borrhålet leder till stora avsänkningar (Misstear, Banks & Clark, 2006).

$$T = \frac{2{,}3Q}{2\pi \cdot \Delta s} \qquad (4)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – pumpflöde (m^3/s), Δs – avsänkning under en tiopotens-cykel (m).

Moyes ekvation (5) relaterar likt Thiems brunnsekvation transmissiviteten och flödet (Moye, 1967). Ekvationen kan användas för att skatta transmissiviteten under stationära förhållanden. Vid utvärdering av ett stationärt förlopp kan däremot inga slutsatser dras

om bergets förmåga att magasinera vatten (Carlsson & Gustafson, 1991). Följaktligen kan inte magasinskoefficienten bestämmas.

$$T_M = \frac{Q \cdot \rho_w \cdot g}{2\pi \cdot dh} \cdot \left[1 + \ln(\frac{L_w}{2r_w})\right] \qquad (5)$$

T_M – transmissivitet beräknad med Moyes ekvation (m^2/s), Q – slutligt pumpflöde (m^3/s), ρ_w - vattnets densitet (kg/m^3), g – tyngdacceleration (m/s^2), dh – skillnad i tryck för total avsänkning (Pa), L_w – längd av sektion (m), r_w- borrhålsradie.

3.4.2 Utvärdering av provpumpning under transienta förhållanden

Att utvärderingen utförs för transienta förhållanden innebär att avsänkningens tidsförlopp analyseras. Avsänkningen är därmed inte konstant (Gustafson, 2009). För ett transient förlopp i en sluten akvifer är Theis metod grundläggande för bestämning av magasinskoefficienten och transmissiviteten. Genom ett polynom kallat Theis brunnsfunktion relateras pumpflödet och avsänkningen till de båda parametrarna som i enkla fall kan bestämmas analytiskt med t.ex. Cooper-Jacobs approximation eller anpassas till en typkurva (Misstear, Banks & Clark, 2006). För vidare läsning om Theis metod och lösningsmetoder rekommenderas litteratur som Misstear, Banks & Clark (2006), Kruseman & de Ridder (1991) eller Domenico & Schwartz (1998).

Antaganden som görs i dessa utvärderingar, förutom laminär strömning och att berget ses som ett kontinuum, är bl. a. att borrhålet antas vara långt i förhållande till sin diameter för att legitimera en radiell strömning i två dimensioner. Radiell, laminär strömning är i de flesta fall ett rimligt antagande under naturliga förhållanden. Dock kan turbulenta flöden uppstå i sprickor eller nära borrhål vilket bör tas i beaktande. Den framräknade transmissiviteten för ett visst borrhål blir resultatet av den generella transmissiviteten för samtliga sprickor längsmed borrhålets längd (Gustafson, 2009).

3.4.2.1 Flödesregim

Vid analys av hur flödet beter sig i berg vid t.ex. enhålsprovpumpningar måste geometrin hos sprickorna tas i beaktande för att få en representativ överblick av bergets hydrauliska egenskaper. Därför väljs en konceptuell modell för grundvattenflödet, som benämns flödesregim eller flödesdimension. Den valda flödesregimen beskriver vilka hydrauliska egenskaper som antas hos berget vilket har stor betydelse vid analyser av mätdata med transient förlopp. Vid en provpumpning är tolkningen av hur avsänkningen förändras med tid initialt inte i huvudsak relaterad till bergets genomsläpplighet om endast tömning av brunnsmagasinet görs, dvs. vattnet som står i borrhålet. Först när vattnet strömmar från berget i större grad än vad brunnsmagasinet töms kan slutsatser om bergets transmissivitet dras (Gustafson, 2009).

Vid en provpumpning beskriver flödesregimen hur flödet ändras med avståndet från brunnen. Det som skiljer flödesregimerna sinsemellan är hur tvärsnittarean ändras med det radiella avståndet från brunnen. Om vattenflödet sker i en dimension såsom i en likformig spricka är tvärsnittsarean konstant med avståndet och flödesregimen linjär. För radiellt flöde i två dimensioner sker flödet i ett plan som i en skiva varför

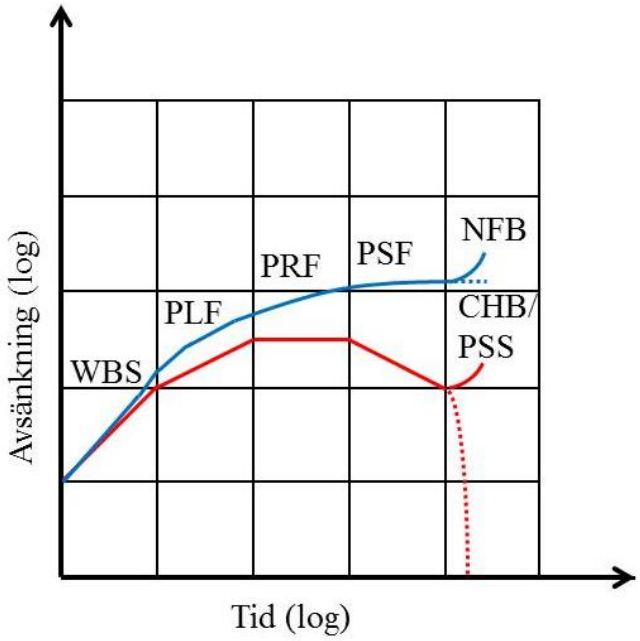
tvärsnittsarean ökar kvadratiskt med avståndet. Det radiella flödet är vanligast att anta i metoder för analys av hydrauliska test. För ett homogent spricksystem med ett sfäriskt flöde från brunnen i tre dimensioner ökar tvärsnittsarean med avståndet i kubik. Hybrider av flödesregimer kan erhållas om en viss flödesgeometri inte helt överensstämmer med ovan nämnda. Orsaken till variationen kan vara t.ex. hur sprickorna i berget är sammanlänkade (Dershowitz & Doe, 1997).

Med programvara såsom AQTESOLV, pro. ver 4.5, (HydroSOLVE, Inc.) kan analyser av provpumpningars transienta förlopp utföras för öppna, slutna eller läckande akviferer med olika styrande flödesregimer. På så sätt kan t.ex. transmissivitet och skin-faktor bestämmas (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016). Vid analys av data från enhålsprovpumpningar behöver således styrande flödesregim bestämmas. Analysen kan utföras genom att studera avsänkningen och dess tidsderivata (lutning) i log-logdiagram och/eller lin-logdiagram av avsänkning mot tid. Beroende på hur avsänkningskurvan och dess derivata förhåller sig kan slutsatser dras om hur flödet ser ut (Tabell 1). Olika flödesregimer kan dominera under olika tidsperioder under provpumpningen (Ludvigson, Källgården & Hjerne, 2004). Utöver brunnsmagasinseffekter (*eng. wellbore storage, WBS*) är möjliga dominerande flödesregimer pseudo-linjär flödesregim (*eng. pseudo-linear, PLF*), pseudo-radiell flödesregim (*eng. pseudo-radial flow regime, PRF*), pseudo-sfärisk flödesregim, (*eng. pseudo-spherical, PSF*) och pseudo-stationär flödesregim (*eng. pseudo-stationary, PSS*) (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016). Med pseudo menas att avsänkningskurvan och flödet i borrhålet ser ut att vara i enlighet med nämnda flödesregim.

Kurvans utseende påverkas även av yttre randvillkor i form av antingen en hydraulisk gräns där flödet minskar betydligt (*eng. no-flow boundary, NFB*) alternativt en hydraulisk gräns där trycknivån är konstant (*eng. constant head boundary, CHB*) (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016). Flödesregimer och hydrauliska gränser ses i en schematisk skiss i Figur 5.

Tabell 1 Hur avsänkningskurvan och dess derivata beter sig för brunnsmagasin, olika flödesregimer samt randvillkor i log-log-skala (Ludvigson, Källgården & Hjerne, 2004; AQTESOLV, pro., ver 4.5, a)

Dominerande påverkan på flödet	Egenskap hos datakurva (log-log)	Egenskap hos derivata (log-log)
WBS	Lutning = 1	Lutning = 1
PLF	Lutning ≈ 0,5	Lutning = 0,5
PRF	Avtagande lutning	Lutning = konstant
PSF	Avtagande lutning	Lutning = -0,5
NFB	Ökande lutning	Snabb ökning
CHB/PSS	Konstant	Snabb minskning till 0



Figur 5 Schematisk skiss över flödesregimer för en provpumpning med konstant hastighet. Den blå kurvan visar avsänkningen och den röda dess derivata. Avsänkning och tid är i logskala. Ej skalenlig. Figur efter Hjerne, Ragvald & Palmfjord (2016).

Initialt påverkar det närliggande berget avsänkningens utveckling. Med tiden speglas hydrauliska egenskaper hos berget längre bort från borrhålet varför olika flödesregimer kan styra vid olika tidpunkter under mätning. Ett mellanting av två flödesregimer eller en övergång mellan dem som styr avsänkningen är vanligare än att många olika flödesregimer styr i skilda sekvenser under samma mätning (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016).

3.5 UTVÄRDERING AV KAPACITETSBESTÄMNING VID BORRNING

Eftersom att en kapacitetsbestämning alltid utförs i samband med borrning av brunnar är det av betydelse att utifrån dessa kunna bestämma hydrauliska egenskaper hos berget, såsom t.ex. hydraulisk konduktivitet och transmissivitet. Detta kan göras med olika metoder som samtliga är approximativa. Vid en kapacitetsbestämning där hela borrhålet töms erhålls ett värde på kapaciteten, Q, vid full avsänkning (Gustafson, 2009). För att

kunna jämföra brunnar sinsemellan divideras brunnens kapacitet med den totala avsänkningen, dh, varpå den specifika kapaciteten, q, fås i enheten $m^3/(m \cdot s)$ (Domenico & Schwartz, 1998).

3.5.1 Avsänkning under kapacitetsbestämning

När den specifika kapaciteten beräknas utifrån en kapacitetsbestämning vid borrning måste avsänkningen under mätningen vara känd, vilket oftast inte är fallet. Därför måste vissa antaganden göras. Ett sätt är att anta avsänkningen är densamma som brunnsdjupet (Gustafson, 2009). Wahlgren m.fl. (2015), tillhörande SGU, och Berggren (1998) har istället vid användning av data från SGU:s brunnsarkiv, där det generellt saknas information om avsänkningen vid borrningens kapacitetsbestämning, använt sambandet i ekvation (6).

$$dh = D_{tot} - D_{pump} - D_{grv} \quad (6)$$

dh – avsänkning (m), D_{tot} – brunnsdjup (m), D_{pump}– pumpens läge ovan borrhålets botten (m), D_{grv} – avstånd mellan markyta och grundvattennivån (m).

I Berggrens studie (1998) begränsades avsänkningen till maximalt 60 m, eftersom att avsänkningen sällan blir större, och D_{pump} sattes till 5 m vilket är en vanlig höjd över botten för pumpen eller punkten för blåsning under kapacitetsbestämning (Berggren, 1998).

3.5.2 Samband mellan specifik kapacitet och transmissivitet

För att relatera specifik kapacitet och transmissivitet finns flera approximativa sätt. Den teoretiska avsänkningen i Thiems brunnsekvation relaterar pumpflödet med transmissiviteten i en ideal, sluten akvifer. Ekvationen tar dock inte hänsyn till igensättningar i borrhålet eller huruvida brunnen är fullständig. För att beakta en avvikande avsänkning inkluderas skin-faktorn, ξ, i ekvation (7) (Gustafson, 2009).

$$Q = \frac{2\pi \cdot T \cdot dh}{\ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) + \xi} \quad (7)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – pumpflöde (m^3/s), dh – avsänkning (m), R_0- influensradie (m), r_w- borrhålsradie (m), ξ – skin-faktor (-).

För en kapacitetsbestämning där hela borrhålet töms fås ett värde för kapaciteten vid full avsänkning ($D_{tot} - D_{grv}$). Om skin-faktorn antas vara något negativ, $\xi \leq 0$, vilket är vanligt för urberg, kan faktorn $2\pi \,/\, (\ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) + \xi)$ approximeras till 1 enligt Gustafson (2009). Med dessa antaganden blir sambandet för en kort testtid enligt ekvation (8). I sambandet benämns Q/d som specifik bergbrunnskapacitet. Transmissiviteten som uppskattas med hjälp av sambandet blir en approximation (Gustafson, 2009).

$$T = \frac{Q}{dh} \leq \frac{Q}{d} = \frac{Q}{D_{tot} - D_{grv}} \quad (8)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – brunnens kapacitet (m^3/s), dh – avsänkning (m), D_{tot} – brunnsdjup, d – avstånd från grundvattenyta till borrhålets botten (m), D_{grv} – avstånd mellan markyta och grundvattennivå (m).

Eftersom brunnsborraren vanligtvis avslutar borrningen av ett borrhål när tillräcklig mängd vatten erhållits påverkar detta skattningen av bergets genomsläpplighet. För brunnar med lägre kapacitet blir borrdjupet större för att uppnå önskat vattenuttag (Gustafson, 2009).

Det finns andra samband som relaterar en brunns kapacitet med transmissivitet i berget. Rhén m.fl. (1997) tog fram följande empiriska samband (ekvation 9) utifrån log-data från ytligare borrhål i Laxemar, Ävrö, Äspö och Bockholmen. Specificering kring dh är inte angiven för sambandet.

$$T = 2{,}24 \cdot \left(\frac{Q}{dh}\right)^{0{,}98} \quad (9)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – brunnens kapacitet (m^3/s), dh – avsänkning (m).

Vid framtagningen av regionala parametrar för hydraulisk konduktivitet i SGU:s Ah-serie användes istället ekvation (10)-(11):

$$K = \frac{Q}{dh \cdot L_w \cdot \alpha} \quad (10)$$

$$dh = D_{tot} - D_{grv} - D_{pump} \quad (11)$$

K – hydraulisk konduktivitet (m/s), Q – brunnens kapacitet (m^3/s), dh – avsänkning (m), L_w – längd av öppen sektion (m), α – konstant (-), D_{tot} – brunnsdjup (m), D_{grv} – avstånd mellan markyta och grundvattennivå (m), D_{pump}- avstånd från borrhålets botten till nivå för pump eller punkten för blåsning (m).

I beräkningarna användes medianvärden för flödeskapaciteten och totaldjupet från markytan till borrhålets botten (D_{tot}). Med en vanlig grundvattennivå på 4 meter under markytan användes detta värde medan punkten för blåsning sattes till 5 m (Hjerne, muntl. källa., 2017-01-25). Parametern α är en konstant som beror av brunnsradien, tid för pumpning och den hydrauliska diffusiviteten som normalt varierar mellan 0,9-1,1 (Berggren, 1998). I SGU:s Ah-serie användes ett värde på 0,8 (Hjerne, muntl. källa., 2017-01-25) för både kristallint och sedimentärt berg. Motsvarande samband för framtagning av transmissiviteten i berg i Ah-serien beskrivs enligt ekvation (12).

$$T = \frac{Q}{dh \cdot 0{,}8} \quad (12)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – brunnens kapacitet (m^3/s), dh – avsänkning (m).

Att approximera transmissiviteten med hjälp av en brunns kapacitet som metod har undersökts i en studie av Wladis & Gustafson (1999) där sambandet mellan

kapacitetsbestämning genom tryckblåsning och transmissiviteten var i fokus. De undersökte möjligheten att data från SGU:s brunnsarkiv skulle ge ett rimligt värde på transmissiviteten i berg inom en storleksordning. Transmissiviteten utvärderades med hjälp av data från SKB från enhålsinjektionstester i Fjällveden och Gideå. I dessa fall skalades injektionstesterna, som utförs på avskärmade sektioner, upp till att representera hela borrhålet och avsänkningen antogs lika med brunnarnas totala djup. Transmissiviteten som beräknades från kapacitetsbestämningar beräknades med Rhéns m.fl. ekvation (1997). Genom statistiska metoder såsom block-kriging, där rumslig interpolation utförs, visades att metoden att relatera kapacitetsbestämning från tryckblåsning till transmissivitet ger en bra grund till mer detaljerade studier och att en regional bild av bergets hydrauliska egenskaper kan erhållas (Wladis & Gustafson, 1999).

3.6 JÄMFÖRELSE AV DATA FRÅN SGU:S BRUNNSARKIV OCH SKB:S PLATSUNDERSÖKNINGAR

I en studie av Gentzschein, Levén & Follin (2007) utfördes en statistisk jämförelse av kapacitetsdata av 22 hammarborrade brunnar i ytberget i Forsmark med en större mängd data från SGU:s brunnsarkiv i Uppland. Undersökningen visade ett större medianvärde för datasetet från Forsmark jämfört med det från brunnsarkivet för både borrhålets totaldjup (143 m respektive 52 m) och brunnshålsdiameter (140 mm respektive 113 mm). Brunnskapacitetens medianvärden för borrhålen i Forsmark var ca 20 ggr större än för SGU:s brunnar. Medianvärdena för den specifika kapaciteten var 8 ggr större i Forsmark. Det framkom även att brunnskapaciteten översteg den maximala kapaciteten vid tryckblåsning i Forsmark (Gentzschein, Levén & Follin, 2007).

En anledning till den statistiskt signifikanta skillnaden mellan medianbrunnskapaciteten i de två områdena är det avsevärt mer högkonduktiva ytberget i Forsmark. En annan aspekt som lyfts i studien är att genom detta högkonduktiva ytberg är det sällan som naturliga förhållanden har mätts på eftersom platsundersökningarna inneburit intensiva borrningar, tryckblåsningar och pumpningar (Gentzschein, Levén & Follin, 2007; se Juston m.fl., 2006).

Osäkerheter som finns vid användandet av data från SGU:s brunnsarkiv diskuteras av Rhén m.fl. (1997). Att borrhålsdjupet styrs av när ett tillräckligt vattenuttag uppnåtts skulle kunna vara en faktor. För högkonduktiva brunnar är avsänkningen under kapacitetsbestämningen rimligtvis mindre än djupet för borrhålet vilket kan göra att T underskattas. Dessutom nämns att det är möjligt att lågkonduktiva brunnar som är torra inte alltid rapporteras in till brunnsarkivet (Rhén m.fl., 1997).

3.7 AQTESOLV, PRO., VERSION 4.5

AQTESOLV (pro., ver 4.5.) är en programvara framtagen av HydroSOLVE Inc. som används för att utvärdera olika typer av hydrauliska mätningar i grundvattenakviferer. I AQTESOLV kan mätdata från provpumpningar importeras och analyseras genom att med modellers hjälp anpassa en kurva till mätdata. I anpassningen väljs den modell som är mest lämpad för de hydrogeologiska flödesförhållandena, borrhålet och utförandet av

provpumpningen. Kurvanpassningen kan antingen ske automatiskt eller manuellt. I programvarans automatiska kurvanpassningsfunktion utförs passning genom minsta kvadratmetoden i en iterativ process. Skillnaden mellan det observerade och simulerade värdet, residualen, i kvadrat summeras och minimeras för testets data (AQTESOLV, pro., ver 4.5, b).

För fastställande av flödesregimer under en provpumpning kan derivataanalys användas som verktyg. Det finns flera sätt att beräkna derivatan i AQTESOLV beroende på vilken upplösning som är nödvändig i vidare kurvanpassning. En metod för att beräkna derivatan är Spanes metod (Spane & Wurstner, 1993) som använder linjär regression för att bestämma lutningen i ett visst logaritmiskt tidsintervall. Vanligtvis ansätts tidsintervallet till mellan 0,1 och 0,5 tidsenheter för att reducera brusighet hos derivatan (AQTESOLV, pro., ver 4.5, a).

En analys över ett transient förlopp kan utföras genom att identifiera styrande pseudo-radiell, pseudo-linjär eller pseudo-sfärisk flödesregim för en sluten respektive läckande akvifer och utifrån flödesregimen välja lämplig modell för kurvanpassning. En modell som kan användas vid enhålsprovpumpningar är Dougherty & Babu (1984) som tar hänsyn till både brunnsmagasin och skin-effekter i borrhålet (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016). En annan metod är Barker (1988) som utöver att beakta skin och brunnsmagasin kan utvärdera flödesregim för testet genom ett så kallat n-värde som beskriver vilken dimension flödet har. Ett värde på n=2 ger ett tvådimensionellt, radiellt flöde medan en sfärisk flödesregim har n=3 (AQTESOLV, pro., ver 4.5, c). För pseudo-sfäriskt flöde under ett transient förlopp kan Moenchs metod (1985) användas för att uppskatta transmissiviteten (Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016). I de nämnda modellerna antas att akviferen är oändligt stor, homogen och av har konstant mäktighet. Andra antaganden som skiljer dem åt sammanfattas i Tabell 2.

Tabell 2 Antaganden för modellerna av Dougherty and Babu (1984), Moench (1985) och Barker (1988) i AQTESOLV (AQTESOLV pro., ver 4.5, c, d och e).

Antagande	**Dougherty & Babu (1984)**	**Moench (1985)**	**Barker (1988)**
Typ av akvifer	Sluten	Läckande, sluten	Sluten
Flödesriktning	Anisotrop	Isotrop	Isotrop
Borrhål penetrerar hela akviferen	Ja eller delvis	Ja	Ja
Flödesregim	Radiell	Sfärisk	Radiell/Sfärisk
Varierande eller konstant pumpflöde	Båda	Båda	Båda
Tar hänsyn till brunnsmagasin	Ja	Ja	Ja
Beräknar magasinskoefficient	Ja	Ja	Ja
Tar hänsyn till skin	Ja	Ja	Ja

4 METOD

Examensarbetet innefattade en studie över både kristallint och sedimentärt berg. För att utvärdera samband mellan kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning och transmissivitet i kristallint berg data från SKB:s mätningar i Forsmark, Laxemar, Ävrö och Simpevarp undersökts. Det uppmätta flödet från kapacitetsbestämning vid borrning av totalt 60 borrhål har utvärderats och jämförts med transmissivitet utvärderad från transienta förlopp (T_T) från provpumpningar utförda med dränkbara pumpar i enskilda, öppna borrhål.

I sedimentärt berg har kapacitetsbestämningar vid borrning för borrhål tillhörande SGU jämförts med egen framtagen data från 15 provpumpningar i sedimentärt berg på Gotland. Enhålsprovpumpningarna har utvärderats under transienta förhållanden i AQTESOLV i enlighet med metodik från SKB:s bearbetning av data.

4.1 ANALYS AV EFFEKTIV AVSÄNKNING VID KAPACITETSBESTÄMNING

Eftersom avsänkningen under en kapacitetsbestämning i samband med borrning normalt inte uppmäts under testet är det nödvändigt att göra ett antagande om hur stor den varit. Beroende på testteknik och specifika hydrauliska förhållanden varierar troligtvis den verkliga avsänkningen under kapacitetsbestämningen mellan olika borrhål. För att undersöka hur avsänkning lämpligast bör antas vid borrning ansattes ett teoretiskt värde kallat den effektiva avsänkningen, dh_{eff}, som beskriver vilken avsänkning som teoretiskt sett gjordes under kapacitetsbestämningen. Avsänkningen antogs inte utifrån borrhålslängd vilket befintliga metoder för skattning av transmissivitet utifrån specifik kapacitet gör (se avsnitt *3.5.1 Avsänkning under kapacitetsbestämning*). Den effektiva avsänkningen beräknades genom att anta att den specifika kapaciteten för ett borrhål var konstant oavsett storlek på avsänkning. Genom att använda specifik kapacitet från provpumpning och kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning kunde då $dh_{eff}(i)$ för varje borrhål (ekvation 13). Observera att den verkliga avsänkningen kan skilja sig från denna rent teoretiska bestämning av $dh_{eff}(i)$, vilket inte är möjligt att bedöma utan mätning av avsänkningen under kapacitetsbestämning.

Genom antagandet att den specifika kapaciteten för ett borrhål är konstant oavsett storlek på avsänkning kunde den effektiva avsänkningen bestämmas för enskilda borrhål. För att kunna använda den effektiva avsänkningen för en större population av kapacitetsbestämningar och brunnar togs ett generellt värde fram för de olika datamängderna för kristallint och sedimentärt berg. För att undersöka om dh_{eff} skiljde sig åt generellt för kristallint och sedimentärt berg minimerades summan av differenserna mellan logaritmerade värden av specifika kapaciteter från kapacitetsbestämning vid borrning respektive provpumpning (ekvation 14). Med hjälp av Excels verktyg *Problemlösaren* kunde den minsta kvadratsumman av differenserna bestämmas. Utifrån ett första ansatt värde på dh_{eff} beräknar verktyget lokala eller globala minimum i en iterativ process för datamängden. Resultatet var det värde på dh_{eff} med minst spridning för datapunkterna (Microsoft Office, u. å.). Ett värde på

dh_{eff} bestämdes för både data för det kristallina och sedimentära berget tillsammans, men även var för sig samt för de olika områdena - Gotland, Forsmark respektive Laxemar, Ävrö och Simpevarp. Detta för att avgöra ifall kristallint och sedimentärt bör skiljas åt vid beräkning av transmissivitet utifrån kapacitet från kapacitetsbestämning. Vid beräkningarna användes all data där både specifik kapacitet från provpumpning och kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning fanns tillgänglig.

$$\frac{Q_p(i)}{dh_p(i)} = \frac{Q(i)}{dh_{eff}(i)} \rightarrow \quad dh_{eff}(i) = \frac{Q(i)}{Q_p(i)/dh_p(i)} \qquad (1)$$

$$\sum \left[\log\left(\frac{Q(i)}{dh_{eff}}\right) - \log\left(\frac{Q_p(i)}{dh_p(i)}\right) \right]^2 \qquad (2)$$

$Q_p(i)$ – sista avlästa pumpflödet vid provpumpning för borrhål i (m^3/s), $dh_p(i)$ – uppmätt avsänkning vid provpumpning för borrhål i (m), $Q(i)$ – brunnens kapacitet från tryckblåsning för borrhål i (m^3/s), $dh_{eff}(i)$ – beräknad effektiv avsänkning vid kapacitetsbestämning för borrhål i (m). dh_{eff} – generell beräknad effektiv avsänkning vid kapacitetsbestämning för en population av borrhål (m).

Antagandet i ekvation (13) medförde att den framtagna effektiva avsänkningen, dh_{eff}, inte skattades utifrån borrhålslängd. Det innebar att den effektiva avsänkningen antogs vara oberoende av borrhålsdjupet, vilket styrktes genom att undersöka om någon korrelation existerade mellan $dh_{eff}(i)$ och D_{tot}. I undersökningen antogs att dh_{eff} inte kunde vara större än värdet för D_{tot}.

4.2 FRAMTAGNING AV SAMBAND MELLAN SPECIFIK KAPACITET OCH TRANSMISSIVITET

För att bestämma det mest lämpade sambandet mellan kapacitet och transmissivitet användes den bästa passningen från analys av den effektiva avsänkningen för att bestämma konstanterna a och b i ekvation (15).

$$T = a \cdot \left(\frac{Q}{dh_{eff}}\right)^b \qquad (15)$$

T – transmissivitet (m^2/s), Q – brunnens kapacitet från tryckblåsning (m^3/s), dh_{eff} generell beräknad effektiv avsänkning vid kapacitetsbestämning för en population av borrhål (m), a, b – konstanter.

För att ta fram samband mellan T och Q/dh_{eff} utfördes linjär regression med minsta kvadrat-metoden av logaritmerade data i Excel. Transmissiviteter utvärderade under transienta förhållanden användes till analysen. Hur väl variablerna överensstämde gällande korrelationen mellan T och Q/dh_{eff} undersöktes med förklaringsgraden eller determinationskoefficienten, r^2. Koefficienten beskriver hur mycket av variationen i y-led (T_T) som kan beskrivas av ändringar i x-led (Q/dh_{eff}) (se t.ex. Körner & Wahlgren, 2015). Att sambandet var statistiskt säkerställt undersöktes med p-värdet. Värdet beskriver hur sannolikt det är att slumpen skapat skillnaden mellan x- och y-värdena vilket är ett sätt att bestämma hur statistiskt signifikant en hypotes är. Med ett p-värde

större än 5 % anses det inte existera någon korrelation mellan parametrarna (Körner & Wahlgren, 2015; Grandin, 2003).

För att undersöka spridningen bestämdes ett konfidensintervall och ett prediktions-intervall med 95 % konfidensgrad kring den linjära regressionen av specifik kapacitet och transmissivitet utvärderad från transient förlopp, där avsänkningen antogs enligt den framtagna effektiva avsänkningen. Konfidensintervallet visar inom vilket område regressionslinjens lutning kan varieras med 95 % sannolikhet. I ett prediktionsintervall anges inom vilket område som ett värde i x-led (Q/dh_{eff}) kan skatta ett y-värde (T_T) med 95 % sannolikhet, och visar då variansen kring regressionen (Grandin, 2003). För att bestämma konfidens- och prediktionsintervall har ekvationerna (16)-(19) använts (Yan & Su, 2009).

$$y_i = \hat{y}(x_i) \pm t_{\alpha/2,n-2} \cdot \hat{\sigma}\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i-\bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (16)$$

$$y_i = \hat{y}(x_i) \pm t_{\alpha/2,n-2} \cdot \hat{\sigma}\sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i-\bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (17)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n-2}} \quad (18)$$

$$S_{xx} = \sum (x - \bar{x})^2 \quad (19)$$

y_i – gräns för intervall i y-led för ett visst x i punkten i. $\bar{x}$ – medelvärdet av samtliga x i datamängd. n – antal värden. $\hat{y}$ – predikterat y-värde, $t_{\alpha/2,n-2}$ – värde från t-fördelning för vald konfidensnivå och antal frihetsgrader, här med α som 0,05 för 95 % intervall. $\hat{\sigma}$– estimerad varians för regressionen (eng. *standard error of regression*), här med två frihetsgrader. S_{xx} – kvadratsumma för skillnaden mellan x och $\bar{x}$. S_{res} – kvadratsumma för residualer, dvs. skillnad mellan y och $\hat{y}$, vilket beskriver den del av variansen som inte förklaras av regressionslinjen.

Ekvation (16) beskriver hur konfidensintervallet beräknades medan ekvation (17) beskriver prediktionsintervallet. Ekvation (18) beskriver hur den estimerade variansen för regressionen ($\hat{\sigma}$) skattades. De predikterade $\hat{y}$-värdena beräknades med funktionen *TREND* i Excel som använder minsta kvadrat-metoden. Den statistiska informationen om bl. a. SS_{res}, som är kvadratsumman av residualerna mellan de verkliga och skattade värdena från regressionen, bestämdes med funktionen *REGR*. S_{xx} bestämdes med *KVADAVV* och är kvadratsumman av skillnaderna mellan x och medelvärdet av x ($\bar{x}$) för datamängden (ekvation 19). Med *T.INV.2T* bestämdes $t_{\alpha/2,n-2}$ ur t-fördelningen för 95 % konfidensnivå och antalet frihetsgrader.

Det framtagna sambandet jämfördes därefter med fyra andra befintliga sätt som används för att skatta transmissiviteten (Tabell 3) utifrån antagen specifik kapacitet från kapacitetsbestämning i samband med borrning. För samband A antogs den största möjliga avsänkningen under kapacitetsbestämningen, dvs. skillnaden mellan borrhålsdjup och grundvattennivån innan pumpstart. För D_{grv}, avståndet från markytan

till grundvattenytans läge, antogs värdet 4 meter. Avsänkningen för samband B, från SGU:s Ah-serie, beräknades på samma sätt men med en begränsad avsänkning på maximalt 60 m. Det innebar att avsänkningen tilldelades värdet 60 m i de fall där borrhålsdjupet var större än 64 m. Värdet 60 m valdes lika som i Berggren studie (1998). Eftersom ingen specificering kring antagande om avsänkning finns för sambandet från Rhén m.fl. (1997) begränsades avsänkningen på två sätt. Dels antogs avsänkningen vara den maximalt möjliga (samband C), dels antogs den vara begränsad till 60 m (samband D).

Tabell 3 Studerade, befintliga samband mellan transmissivitet och specifik kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning. Transmissiviteten (T) skattades på fyra olika sätt som benämns A-D. För det första sambandet, A, antogs den största möjliga avsänkningen (dh) vilket är skillnaden mellan borrhålsdjupet (D_{tot}) och grundvattennivån (D_{grv}). I sambandet liknande det från SGU:s Ah-serie, B, begränsades avsänkningen till maximalt 60 m. Dessa två sätt att begränsa avsänkningen gjordes även för sambandet från Rhén m.fl. (1997), C respektive D.

Samband		**Antagande om avsänkning**	**Referens för samband**
A	$T = \frac{Q}{dh}$	$dh = D_{tot} - D_{grv}$	-
B	$T = \frac{Q}{(0{,}8 \cdot dh)}$	$dh = D_{tot} - D_{grv}$ samt $dh_{max} = 60\ m$	SGU:s Ah-serie
C	$T = 2{,}24 \cdot \left(\frac{Q}{dh}\right)^{0{,}98}$	$dh = D_{tot} - D_{grv}$	Rhén m.fl. (1997)
D	$T = 2{,}24 \cdot \left(\frac{Q}{dh}\right)^{0{,}98}$	$dh = D_{tot} - D_{grv}$ samt $dh_{max} = 60\ m$	Rhén m.fl. (1997)

4.3 ANALYS I KRISTALLINT BERG

Data från SKB:s databas SICADA (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017a) har använts i analysen av mätningar i Forsmark och Oskarshamnsområdet. I analysen har totalt 60 enhålsprovpumpningar och kapacitetsbestämningar vid borrning studerats från i de olika områdena (Tabell 4).

Tabell 4 Antal datapunkter (n) som använts i Forsmark samt Ävrö, Laxemar och Simpevarp. Medeldjup ($D_{tot,medel}$) och mediandjup ($D_{tot,median}$) för borrhålslängder från markytan i m visas. Djupet avser det vertikala djupet för borrhålen.

Område	$D_{tot,medel}$ **(m)**	$D_{tot,median}$ **(m)**	n
Forsmark	148	148	37
Laxemar, Ävrö och Simpevarp	153	153	23

Data som använts för den kristallina berggrunden innefattar kapacitet från borrning samt specifik kapacitet och transmissivitet från provpumpningar i de nämnda områdena. Kapacitetsbestämningar utfördes i samband med borrning av de använda hålen för att bestämma kapaciteten. Generellt utfördes mätningarna med tryckblåsning där flödet mättes genom att ta tid på hur lång tid det tog att fylla en viss känd volym alternativt

genom att mäta återhämtningen efter pumpstopp (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017b). Provpumpningar med dränkbar pump utfördes i samband med platsundersökningarna i syfte att bestämma hydrauliska parametrar för berget. Dessa genomfördes med konstant pumphastighet i både öppna sektioner och sektioner som avgränsades med manschett. Under mätningen registrerades grundvattentryck, grundvattennivåer och eventuella ändringar av flödet. Utifrån provpumpningar utvärderades bl. a. transmissivitet och skin-faktor (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017c).

4.3.1 Databearbetning

Data som använts vid analys av det kristallina berget har hämtats från SKB:s databas SICADA (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017a) och SKB:s publika rapporter. Databearbetningen har endast behandlat enhålsprovpumpningar som utförts i hammarborrade borrhål i berg. Vid urvalet av datapunkter har mätningar för öppna borrhål använts, vilket innebär att manschettmätningar där endast specifika sektioner undersökts har tagits bort. För borrhål där ingen kapacitet har angetts vid borrning har värden från borrhålsrapporter använts om möjligt. I några fall fanns både kapacitet i SICADA och borrhålsrapporter. Värdet på Q valdes då från SICADA, med undantag för ett borrhål (HLX39) i Laxemar. För brunnsdjupet D_{tot} har det vertikala djupet använts för samtliga borrhål. I de fall där flera provpumpningar funnits för samma borrhål har ett valts ut. Urvalet har baserats på om testet utförts i hela sektionen, om T utvärderat under transienta förhållanden fanns och ansågs vara det bästa möjliga i datasetet samt eventuella kommentarer. Ett borrhål i Simpevarp, HSH04, användes inte i studien på grund av att utvärderingen av det transienta förloppet inte ansågs tillräckligt tillförlitlig (se Rahm & Enachescu, 2004).

Endast transmissiviteter utvärderade från transienta förlopp har använts. I de fall där det i datasetet var beskrivet att värdet utvärderat under stationära förhållanden, framtaget med Moyes ekvation (1967), ansågs bättre har borrhålet inte tagits med i studien. För ett borrhål, HSH05, valdes ett annat värde på transmissiviteten utvärderad från ett transient förlopp ($4{,}23 \cdot 10^{-6}$ m^2/s) från Rahm & Enachescu (2004) trots att värde ($5{,}22 \cdot 10^{-4}$ m^2/s) fanns tillgängligt i SICADA. Detta på grund av att en bättre passning erhölls från rapportens flödesperiod jämförelsevis med återhämtningsfasen för provpumpningen.

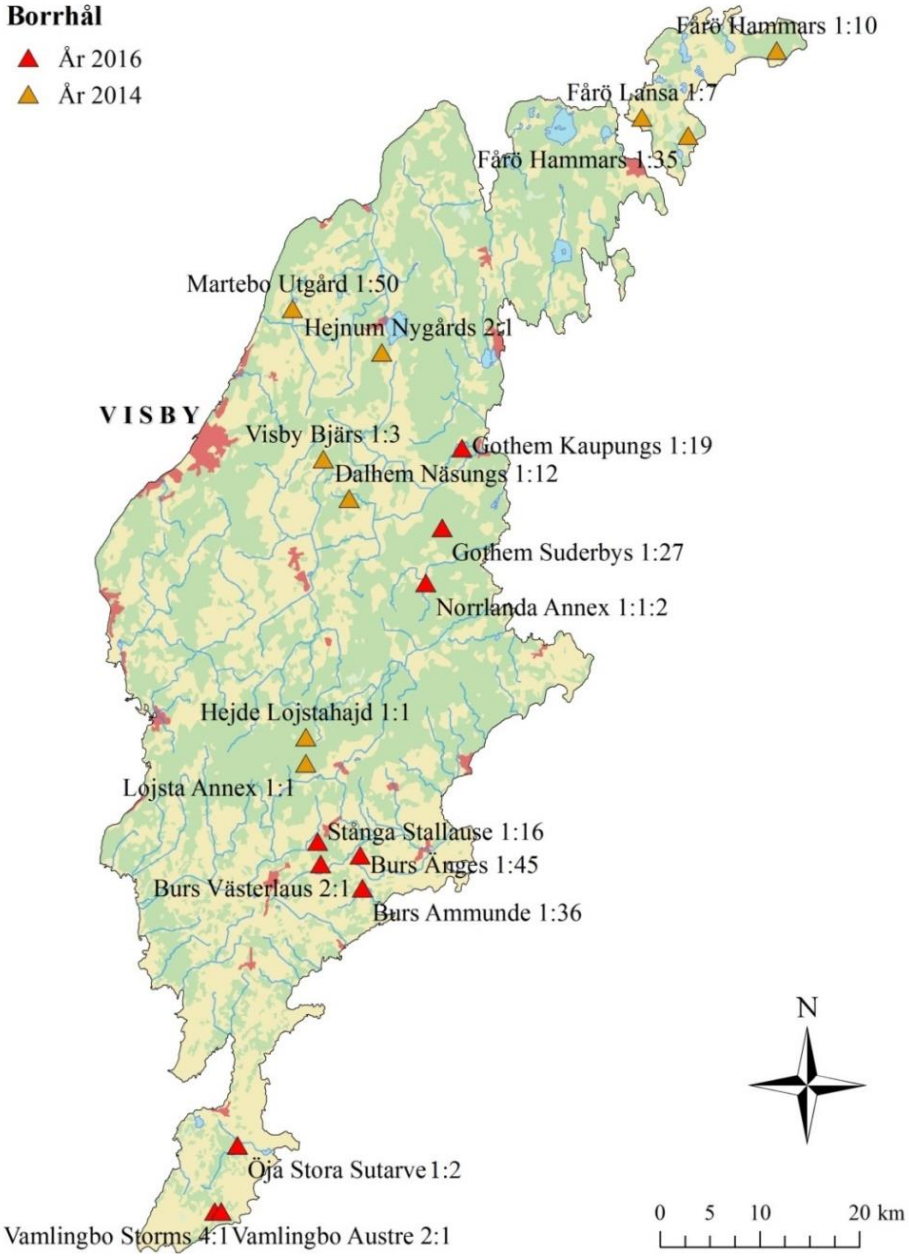
För vissa borrhål fanns transmissiviteter utvärderade under transient förhållanden tillgängliga, men eftersom att flödet vid kapacitetsbestämningen under borrning var så pass lågt att det ej var mätbart kunde dessa inte användas vid jämförelsen. Två exempel på detta var borrhålen HFM25 och HFM28 i Forsmark där provpumpningar gav T_T på $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ respektive $9 \cdot 10^{-6}$ m^2/s trots att flödet vid kapacitetsbestämningen rapporterats ha varit under mätgräns.

4.4 ANALYS I SEDIMENTÄRT BERG

På grund av att inga data över transmissivitet utvärderad från transienta förlopp fanns tillgängliga för sedimentär berggrund utfördes inom ramen för detta examensarbete provpumpningar på Gotland som sedan analyserades i enlighet med metodiken för SKB:s data för det kristallina berget. Information om kapacitetsbestämning vid borrning och borrhålens geometri har hämtats från brunnsprotokoll som är tillgängliga i SGU:s brunnsarkiv.

4.4.1 Utförande av provpumpningar

Borrhålen som studerades var lokaliserade på Gotland (Figur 6) och benämndes lika som fastighetsbeteckningen för respektive borrhål. Samtliga borrhål borrades med sänkhammare där en kapacitetsbestämning utfördes genom tryckblåsning i 0,5 tim enligt brunnsprotokoll. Borrhålen var anlagda år 2014 och 2016 i samband med geofysiska undersökningar som genomfördes av SGU (se Dahlqvist m.fl., 2015). Syftet med dessa borrhål var att studera berggrundens uppbyggnad. Borrhålens djup valdes följaktligen med avseende på detta syfte. Berggrunden studerades genom att resistiviteten mättes med geofysisk borrhålsloggning. De borrhål som anlades år 2014 hade varierande djup på mellan 81 och 130 m (Dahlqvist m.fl., 2015). Borrhålen från år 2016 var mellan 30 och 80 m djupa (Dahlqvist m.fl., 2017). Koordinater för de använda borrhålen återfinns i Appendix C – Provpumpningar på Gotland.



Figur 6 Karta över tillgängliga borrhål på Gotland (GSD-Översiktskarta ©Lantmäteriet). Röda punkter är borrhål anlagda år 2016 och orangea år 2014. Borrhålens koordinater har hämtats från brunnsprotokoll i SGU:s brunnsarkiv samt Alm (2014) och (2017).

Borrhålens fastighetsbeteckning, totaldjup enligt brunnsprotokoll, foderrörlängd, jorddjup och uppmätt brunnskapacitet vid borrning sammanfattas i Tabell 5. Kapaciteten för brunnarna varierar från 0 liter/tim till 18 000 liter/tim.

Tabell 5 Fastighetsbeteckning, brunnsdjup, D_{tot}, i meter under markyta (m u my), foderrörets längd i m u my samt kapacitet, Q, från kapacitetsbestämning vid borrning enligt borrprotokoll i liter/tim.

Fastighetsbeteckning	**Brunnsdjup, D_{tot} (m u my)**	**Djup för foderrör (m u my)**	**Jorddjup (m)**	**Kapacitet vid borrning, Q (liter/tim)**
Fårö Hammars 1:10	81	6	2,8	12 000
Fårö Lansa 1:7	105	6	0,1	6000
Fårö Hammars 1:35	90	6	0,1	15 000
Martebo Utgård 1:50	82	6	1,8	6000
Hejnum Nygårds 2:1	130	6	0,1	9000
Gothem Kaupungs 1:19	60	6	4	7200
Visby Bjärs 1:3	110	6	1,2	1500
Dalhem Näsungs 1:12	110	6	3,4	9000
Gothem Suderbys 1:27	30	6	0	18 000
Norrlanda Annex 1:1:2	73	6	3	7200
Hejde Lojstahajd 1:1	130	6	0,1	15 000
Lojsta Annex 1:1	90	6	1,6	1500
Stånga Stallause 1:16	40	15	13	6000
Burs Änges 1:45	40	6	0,5	420
Burs Västerlaus 2:1	80	18	0	2100
Burs Ammunde 1:36	30	9	4,5	510
Öja Stora Sutarve 1:2	50	6	2,8	0
Vamlingbo Storms 4:1	35	6	2,7	0
Vamlingbo Austre 2:1	40	6	4	600

Provpumpningar skedde i form av enhålspumptest där avsänkningen mättes i borrhålet vid pumpning med konstant hastighet. Tiden för varje provpumpning bestämdes i fält genom att uppmätt avsänkning studerades i AQTESOLV under pågående pumpning. Analysen grundade beslutet om hur lång tid som krävdes för att en entydig lösning skulle kunna erhållas vid senare modellpassning. Därmed varierade pumptiden mellan 7 och 150 min.

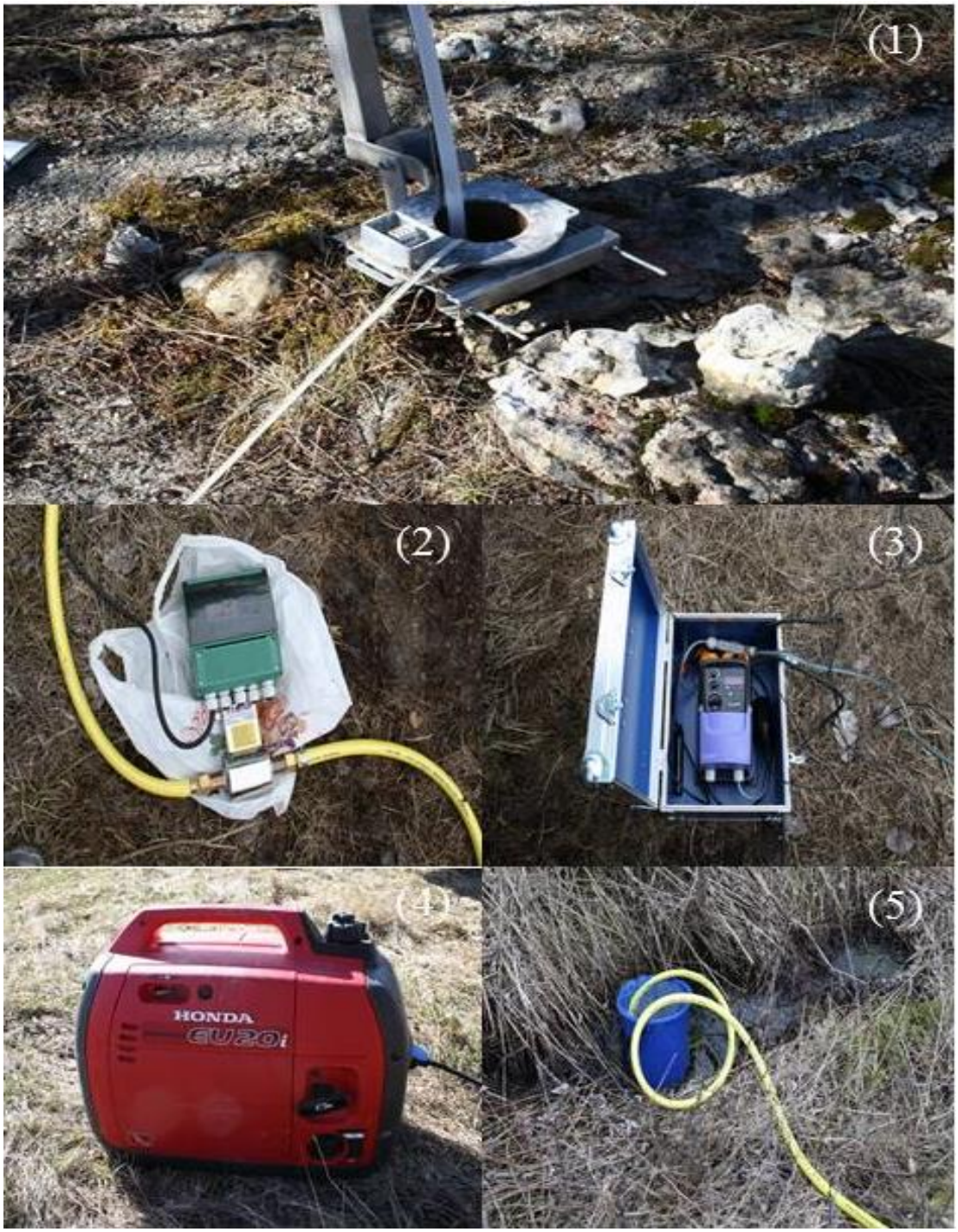
Vid provpumpningarna mättes totaltrycket med hjälp av en tryckgivare som tillsammans med pump och tillhörande slang i plast sänktes ned i borrhålet (Figur 7). Totaltrycket i borrhålet mättes med syftet att bestämma avsänkningen hos grundvattenytan. Tryckgivaren var monterad en dryg halvmeter ovanför pumpen och var fäst vid pumpslangen. Den dränkbara pumpen som användes hade ingen backventil vilket gjorde att flödet kunde rinna ur pumpen vid pumpstopp. Maximal uppfordringshöjd var 30 m och flödet kunde varieras mellan 0-2 m^3/tim (Eijkelkamp, 2017). Pumpen styrdes med hjälp av en frekvensomvandlare med en maximal frekvens på 400 Hz. Vatten pumpades upp ur borrhålet genom plastslangen och genom en anslutning på den bobin som utrustningen kunde vevas upp på mellan mätningar. Dit kopplades en elektromagnetisk flödesmätare med tillhörande flödesförstärkare där

vattenflödet manuellt kunde avläsas och antecknas till protokoll under flödestransporten bort genom avbördningsslangen. Avbördningen avleddes till kringliggande lägre mark, diken eller sänkor för att inte påverka pågående mätning.

Figur 7 Uppställning under pågående provpumpning i Fårö Hammars 1:10. I figuren ses utrustningen nedsänkt i borrhålet via brythjulet. Vattenflödet går via anslutningen från pumpslang till flödesmätaren som ses på kanten av bobinen, genom den gula slangen förbi ansluten flödesmätare och vidare bort med avbördningsslang. Till vänster om bobinen ses frekvensomvandlare och i förgrunden ses kabelljuslodet.

Under provpumpning mättes även lufttrycket uppe vid markytan för att säkerställa att inga större lufttrycksförändringar skedde under test samt för att kunna beräkna hur vattentrycket i borrhålet ändrades. För att ha uppsikt över avsänkningen samt validera tryckgivarens uppmätta värden användes ett kabelljuslod för att manuellt mäta avsänkningen. Väderförhållanden, kommentarer om borrhålets koordinater och övriga händelser under pumptest antecknades.

Fullständig förteckning över utrustning finns i Appendix C – Provpumpningar på Gotland. Innan provpumpningar utfördes på Gotland testades utrustningen i ett pumptest i ett borrhål vid Geosigmas verkstad i Librobäck, Uppsala. En del av utrustningen visas i Figur 8.



Figur 8 (1) Utrustning nedsänkt i borrhål i Hejde Lojstahajd 1:1. (2) Flödesmätare. (3) Frekvensomvandlare och lufttrycksgivare till vänster i lådan. (4) Elaggregat. (5) Avbördning under provpumpning.

4.4.1.1 Datainsamling

Datainsamlingen under provpumpningarna utfördes med olika mätintervall. Tryckgivaren som mätte totaltrycket i borrhålet hade mätintervall som visas i Tabell 6.

Tabell 6 Mätintervallen under provpumpning för tryckgivaren i borrhålet.

Mätintervall (s)	Tid (min)
1	5
2	5
3	5
5	20
10	20
15	30
20	30
30	-

Tryckgivaren som mätte lufttrycket vid markytan mätte kontinuerligt var 10 s under hela provpumpningen. Lodning och avläsning av flödesmätaren gjordes manuellt med fler avläsningar inledningsvis.

4.4.1.2 Databearbetning

Innan provpumpningarna kunde utvärderas i AQTESOLV bearbetades dem i Excel. Definitiv pumpstart och pumpstopp bestämdes samt eventuella tider för byte av pumpflöde. För att beräkna vattentrycket från det uppmätta totaltrycket i borrhålet interpolerades lufttrycket för att få likvärdigt många datapunkter. Därefter kunde vattentrycket beräknas för varje datapunkt genom att subtrahera lufttrycket i punkten från totaltrycket.

Beräkning av avsänkning utfördes med de framtagna värdena på vattentrycket genom ekvation (20). Det initiala totaltrycket p_0 (kPa) beräknades som medelvärdet av ca 10-15 mätvärden precis innan pumpstart. Det värdet justerades med medelvärdet av lufttrycket under testet, p_{luft} (kPa), och dividerades med 9,81 för omvandling från kPa till meter vattenpelare (mvp). Avsänkningen dh i varje punkt i beräknades därefter genom att subtrahera vattentrycket i mvp.

$$dh_i = h_0 - h_i = \frac{p_0 - p_{luft}}{9{,}81} - \frac{p_i}{9{,}81} \qquad (20)$$

dh_i – avsänkning (mvp), h_0 – vattentrycknivå innan pumpstart (mvp), h_i - vattentrycknivå vid tidpunkt i, p_0 – totaltryck innan pumpstart (kPa), p_{luft} – medellufttryck under test (kPa), p_i – vattentryck vid tidpunkt i (kPa), 9,81 (kPa/mvp) är en omvandlingsfaktor mellan kPa och mvp.

Avsänkningen bestämdes även för de lodade värdena som skillnaden mellan de lodade trycknivåerna, i meter under röröverkant på foderröret (m u rö), under testet och den lodade trycknivån precis innan pumpstart.

4.4.2 Utvärdering av provpumpningar under transienta förhållanden

Enhålsprovpumpningarna utförda på Gotland utvärderades i AQTESOLV med syftet att ta fram skattningar av transmissivitet utvärderade från transienta förlopp, T_T. Metoden är i enlighet med hur värden på T_T är framtagna i SKB:s platsundersökningar (se t.ex. Ludvigson m.fl. (2004)). I AQTESOLV utfördes utvärderingen i programvarans

Pumping Test Wizard med typen *Single-well test*. Indata till AQTESOLV var avsänkningen som bestämts från tryckgivaren (mvp), pumpflöden (m^3/s) samt foderrörets och borrhålets respektive radier (m). Generellt lades samtliga ändringar av pumpflöden in i AQTESOLV, för vissa borrhål valdes representativa värden ut för att underlätta utvärderingen.

För att ta fram transmissiviteten från utvärderat transient förlopp, T_T, för respektive provpumpning användes inledningsvis derivataanalys för att kunna bedöma hur avsänkning och derivata förhöll sig gentemot varandra. Detta genom att undersöka vilket värde som gav en representativ bild av avsänkningen utan för mycket brus. Ett värde mellan 0,1 och 0,5 ansattes för derivatan med Spanes metod (Spane & Wurstner, 1993). Därefter utfördes en kvalitativ analys med identifiering av flödesregimer som gjordes utifrån avsänkningskurvans och derivatans karaktär (Tabell 1). Med hjälp av försök med olika modeller i AQTESOLV kunde hypoteser kring dominerande flödesregim testas.

Utifrån kvalitativt utvärderad flödesregim valdes modell för en kvantitativ analys genom kurvanpassning till data. För en avsänkning med trolig PRF valdes Dougherty-Babus modell (1984) för en sluten akvifer. För dessa relativt korta provpumpningar med relativt små avsänkningar i berg ansågs det relevant att betrakta systemet som slutet eftersom de flödesdominerande sprickorna troligtvis inte töms helt på vatten. För en dominerande PSF antogs akviferen kunna utvärderas med Moenchs modell (1985) för en läckande akvifer. Båda dessa modeller inkluderar skin- och borrhålsmagasins-effekter. Vid modellanpassningen valdes parametrarna enligt Tabell 7, där vissa var aktiva och andra inaktiva i passningen. De aktiva parametrarna tilläts variera inom valda intervall och utifrån den valda modellen medan de inaktiva parametrarna ansattes på olika sätt. I skattningen tilläts skin-faktorn vara något lägre än -5, som ofta ses annars som en lägsta negativ gräns. Positiva värden på skin-faktorn överskrider sällan 20 (AQTESOLV, pro., ver 4.5, f; Horne, 1995).

Tabell 7 Aktiva och inaktiva parametrar vid modellanpassning i AQTESOLV av data från provpumpningar. T_T beskriver transmissivitet utvärderad från transient förlopp (m^2/s), S är magasinskoefficienten (-), K_z/K_r (-) beskriver förhållandet mellan hydraulisk konduktivitet i vertikalt och horisontellt led, S_w (-) är skin-faktor, r_w är borrhålets radie (m) och $r(c)$ (m) är foderrörets inre radie.

Parameter	**Skattning**	**Värde**	
T_T (m^2/s)	Aktiv	-	
S (-)	Inaktiv	Enligt ekvation (21)	
K_z/K_r (-)	Inaktiv	1	
r_w (m)	Inaktiv	0,0575	
		Min-värde	**Max-värde**
S_w (-)	Aktiv	-10	10
$r(c)$ (m)	Aktiv	$1 \cdot 10^{-5}$	10

Vid analys i AQTESOLV utvärderades skin-faktorn S_w (som den benämns i AQTESOLV) och magasinskoefficienten S separat då dessa är starkt korrelerade. I den

kvantitativa analysen ansattes ett initialt värde på magasinskoefficienten S till 10^{-6} (se t.ex. Hjerne, Ragvald & Palmfjord, 2016) för att bestämma skin-faktorn. Därefter användes AQTESOLV:s automatiska kurvanpassningsfunktion för att bestämma ett preliminärt värde på T_T. Med det framtagna värdet på T_T beräknades ett nytt värde på S genom följande empiriska samband (Rhén m.fl., 2006):

$$S = 0{,}0007 \cdot {T_T}^{0{,}5} \qquad (3)$$

S – magasinskoefficient (-), T_T – transmissivitet utvärderad från transient förlopp (m^2/s).

Med den framtagna skin-faktorn och beräknat S utfördes kurvanpassningen igen för att få fram ett slutgiltigt T_T. Detta tillvägagångssätt är i enlighet med utvärderingsrutinerna som använts inom undersökningarna från SKB. Ett annat sätt hade varit att använda modeller utan skin-faktor alternativt ansätta skinfaktorn till 0, och istället bestämma S genom kurvanpassning. Generellt erhålls samma värde på transmissiviteten med detta alternativ. Nackdelen är dock att orimliga värden på S kan fås genom en utvärdering på detta sätt.

4.4.3 Utvärdering av provpumpningar under stationära förhållanden

En utvärdering av ett antaget stationärt förlopp för provpumpningarna utfördes med Moyes ekvation (1967) (ekvation 5). Dessa värden på transmissiviteten, T_M, användes inte fortsättningsvis i analysen utan användes endast för en kvalitativ jämförelse med T framtagna utifrån utvärderingar av transienta förlopp. Vid beräkning användes det sista pumpflödet, Q_p, oavsett om det ändrats under testets gång. Längd av sektion, L_w, var avståndet från borrhålets botten till foderrörets nederdel.

5 RESULTAT

All data från SICADA (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017a) och borrhålsrapporter som använts för analys i kristallint berg återfinns i Appendix A. I Appendix B och Appendix C finns data för analysen i sedimentärt berg från brunnsprotokoll samt resultat av provpumpningar och utvärderingar över transienta förlopp.

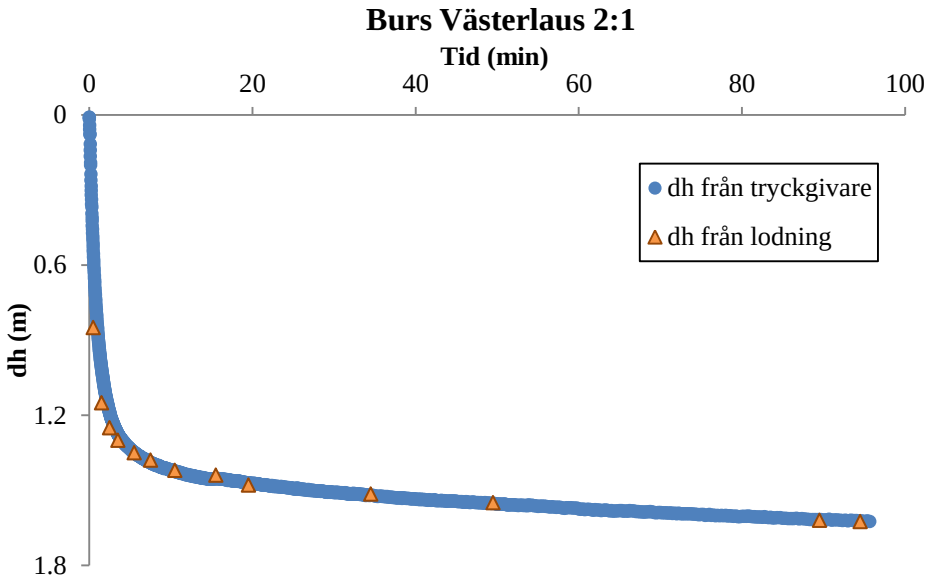
5.1 PROVPUMPNINGAR I SEDIMENTÄRT BERG

Totalt genomfördes 15 enhålsprovpumpningar i sedimentärt berg på Gotland av de 19 borrhål som fanns att tillgå. Borrhålens medel- och mediandjup var betydligt mindre för de använda borrhålen (Tabell 8) än för de i kristallint berg som anlagts av SKB (Tabell 4). Provpumpningar genomfördes inte i Gothem Suderbys 1:27, Burs Änges 1:45, Vamlingbo Storms 4:1 och Burs Ammunde 1:16. Borrhålet i Gothem Suderbys 1:27 var artesiskt med för högt flöde för att kunna göra en avsänkning med tillgänglig utrustning. Burs Änges 1:45 och Burs Ammunde 1:16 var otillgängliga på grund av översvämmade, leriga och dåliga vägar. I Vamlingbo Storms 4:1 fanns ljus olja i borrhålet som gjorde det olämpligt att genomföra pumpning.

Tabell 8 Medel- ($D_{tot,medel}$) och mediandjup ($D_{tot,median}$) hos de tillgängliga borrhålen i sedimentärt berg på Gotland samt antal datapunkter (n).

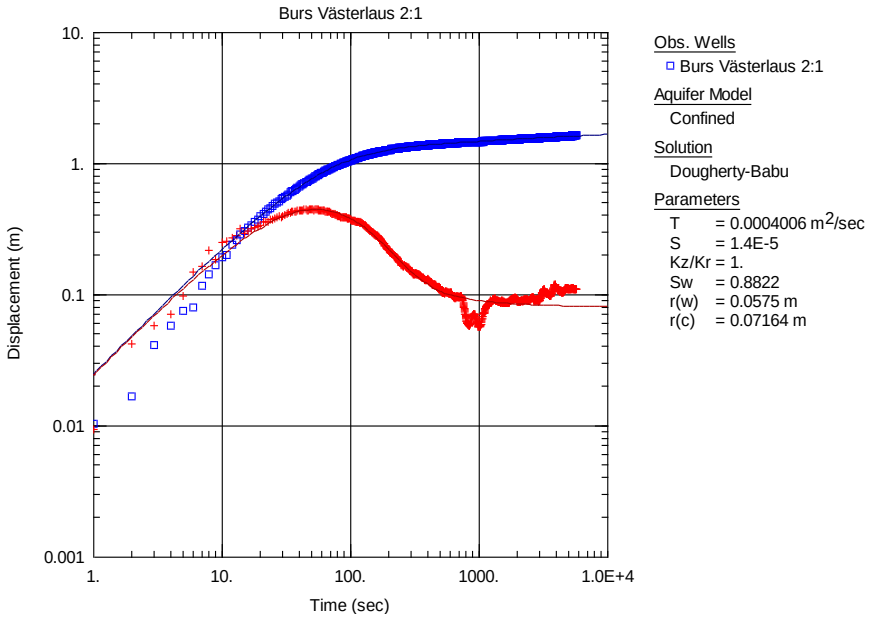
Område	$\boldsymbol{D_{tot,medel}}$ **(m)**	$\boldsymbol{D_{tot,median}}$ **(m)**	$\boldsymbol{n}$
Gotland	85	82	15

Samtliga beskrivningar av provpumpningarnas utförande med figurer över avsänkning, vatten- och lufttryck samt utvärderingar av transienta förlopp i AQTESOLV återfinns i Appendix C – Provpumpningar på Gotland. I Figur 9 och Figur 10 visas resultat för provpumpning i Burs Västerlaus 2:1 som ett exempel. Figur 9 visar avsänkningens förlopp vid pumpning i Burs Västerlaus 2:1. De lodade grundvattennivåerna överensstämmer med tryckgivarens uppmätta värden för avsänkningen. Den totala avsänkningen i Burs Västerlaus 2:1 var 1,63 m. Lufttrycket under provpumpningen var konstant ca 102 kPa.



Figur 9 Avsänkningens (dh) förlopp över tid i enheterna meter respektive minuter för Burs Västerlaus 2:1. Både värden från tryckgivaren i borrhålet som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I AQTESOLV beräknades derivatan med hjälp av Spanes metod (1993) med ansatt värde på 0,2 i detta fall. I Figur 10 ses att provpumpningen fram till ca 20 s initialt är starkt påverkat av brunnsmagasinseffekter. Den kvalitativa analysen resulterade i att en pseudo-radiell flödesregim antogs. Modellen av Dougherty-Babu (1984) användes därför för den kvantitativa utvärderingen.



Figur 10 Kurvanpassning för Burs Västerlaus 2:1 i AQTESOLV. Den blå kurvan visar avsänkningen och den röda visar derivatan. Derivatan har beräknats med hjälp av Spanes metod (1993) med ansatt värde på 0,2. Den mörkblå kurvan visar modellanpassning till avsänkningen med Dougherty-Babu (1984) och den mörkröda visar modellens anpassning till derivatan.

Resultat från utvärderingar av transienta förlopp av för samtliga provpumpningar i form av transmissivitet (T_T) och skin-faktor (S_w) sammanställs i Tabell 9. För Hejnum Nygårds 2:1, Visby Bjärs 1:3, Fårö Lansa 7:1, Fårö Hammars 1:10 och Öja Stora Sutarve 1:2 kunde ingen utvärdering av det transienta förloppet utföras. För Hejnum Nygårds 2:1 var inflödet i borrhålet mycket begränsat under testet vilket resulterade i en kraftig avsänkning. Pumpningen avbröts efter ca 7 min, vilket medförde att ingen kurvpassning i AQTESOLV kunde göras. Dock mättes en del av återhämtningen i hålet, som användes för att skatta ett värde på flödet från berget och igenom det den specifika kapaciteten från testet. I Visby Bjärs 1:3 resulterade den kvalitativa utvärderingen endast i en PLF vilket omöjliggjorde en entydig modellpassning med AQTESOLV. Inte heller för Fårö Lansa 7:1 och Öja Stora Sutarve 1:2 kunde entydiga kurvanpassningar erhållas. För dessa två test konvergerande inte modellpassningarna till någon rimlig lösning, utan de resulterade båda i en orimligt hög skin-faktor. I Fårö Hammars 1:10 blev avsänkningen mycket snabbt stationär vilket omöjliggjorde en utvärdering av det transienta förloppet under pumpfasen. Avsänkningen var endast 0,06 m, vilket användes för beräkning av T_M.

I Tabell 9 visas även resultat från provpumpningar i form av det sista avlästa pumpflödet (Q_p), avsänkning (dh), specifik kapacitet för provpumpning (Q_p/dh_p) och transmissivitet utvärderad för stationära förhållanden (T_M). För Hejnum Nygårds 2:1 visas skattning från återhämtningen efter utförd provpumpning. T_M är generellt av samma storleksordning som T_T.

Tabell 9 Resultat av provpumpningar i sedimentärt berg på Gotland. I AQTESOLV har transmissivitet skattad från transient förlopp T_T (m^2/s) och skinfaktor S_w (-) utvärderats. Det sista avlästa flödet Q_p (m^3/s) och motsvarande avsänkning dh_p (m) användes till skattning av specifik kapacitet Q_p/dh_p (m^2/s). Även transmissivitet utvärderad från antaget stationärt förlopp T_M (m^2/s) visas. Värden markerade med * är skattade utifrån återhämtningen i borrhålet.

Borrhål	T_T (m^2/s)	S_w (-)	Q_p (m^3/s)	dh_p (m)	Q_p/dh_p (m^2/s)	T_M (m^2/s)
Martebo Utgård 1:50	3,54E-04	-3,10	5,46E-04	1,25	4,37E-04	5,20E-04
Gothem Kaupungs 1:19	4,19E-04	-4,90	5,40E-04	1,12	4,84E-04	5,53E-04
Dalhem Näsungs 1:12	6,19E-03	2,72	5,50E-04	0,14	4,02E-03	5,03E-03
Fårö Hammars 1:35	8,47E-05	-6,57	5,20E-04	2,36	2,20E-04	2,66E-04
Norrlanda Annex 1:1:2	2,77E-03	-5,16	5,46E-04	0,17	3,13E-03	3,57E-03
Hejde Lojstahajd 1:1	6,76E-04	-4,59	5,30E-04	0,79	6,69E-04	2,28E-05
Lojsta Annex 1:1	6,55E-05	-2,82	3,52E-04	5,41	6,50E-05	7,88E-05
Stånga Stallause 1:16	3,00E-05	-5,81	5,10E-04	7,45	6,85E-05	6,95E-05
Burs Västerlaus 2:1	4,01E-04	0,88	3,90E-04	1,63	2,40E-04	2,78E-04
Vamlingbo Austre 2:1	9,23E-07	-6,14	4,20E-05	12,30	3,42E-06	3,64E-06
Öja Stora Sutarve 1:2	-	-	4,00E-05	16,99	2,35E-06	2,61E-06
Hejnum Nygårds 2:1	-	-	1,72E-07*	14,92*	1,16E-08*	-
Visby Bjärs 1:3	-	-	5,10E-04	0,45	1,13E-03	3,12E-03
Fårö Hammars 1:10	-	-	5,10E-04	0,06	8,50E-03	1,01E-03
Fårö Lansa 7:1	-	-	9,40E-05	12,08	7,78E-06	9,62E-06

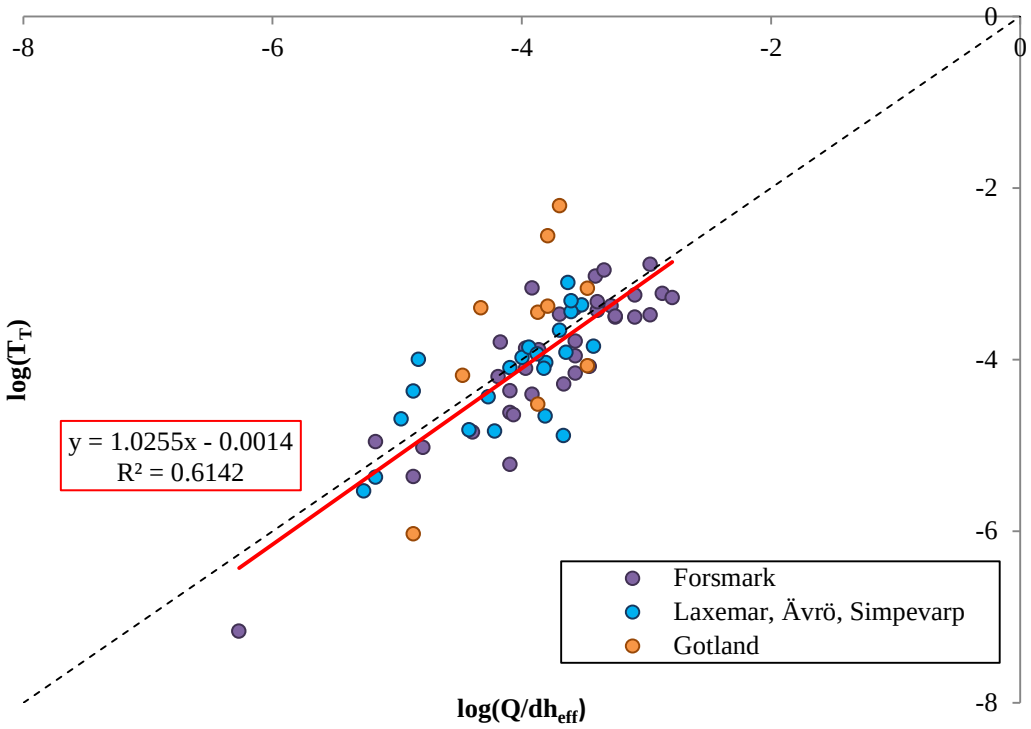
5.2 ANALYS AV EFFEKTIV AVSÄNKNING VID KAPACITETSBESTÄMNING

Beräkningarna av den effektiva avsänkningen vid kapacitetsbestämning i samband med borrning presenteras i Tabell 10. All data användes med undantag för Öja Stora Sutarve 1:2, som enligt kapacitetsbestämning i samband med borrning hade en kapacitet på 0 liter/tim. Resultaten visar att den effektiva avsänkningen, dh_{eff}, om all tillgänglig data används är 12,37 m. En skillnad på ca 3 m fås om det kristallina och sedimentära studeras var för sig. En skillnad på nästan 2 m finns om Forsmark och Laxemar, Ävrö och Simpevarp studeras för sig. För att legitimera användningen av dh_{eff} som oberoende av borrhålslängden (D_{tot}) visas i att ingen korrelation finns för parametrarna Appendix D – Effektiv avsänkning som funktion av brunnsdjup.

Tabell 10 Beräknade värden på den effektiva avsänkningen, dh_{eff} (m), för de olika datamängderna. Antalet datapunkter beskrivs av n.

Datamängd	$\boldsymbol{dh_{eff}}$ **(m)**	$\boldsymbol{n}$
All data	12,37	74
Kristallin berggrund	13,02	60
Forsmark	13,76	37
Laxemar, Ävrö och Simpevarp	11,92	23
Sedimentär berggrund (Gotland)	9,93	14

I Figur 11 visas den linjära regressionen mellan specifik kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning och transmissiviteten utvärderad från transienta förlopp från provpumpningar. Regressionen är utförd för all tillgänglig data för både kristallin och sedimentär berggrund med dh_{eff} ansatt till 12,37 m. I och med att den effektiva avsänkningen är densamma för alla punkter kan transmissiviteten uttryckas som en funktion av kapacitet, Q. En större spridning kring regressionen ses för de framtagna värdena för Gotland jämfört med data avseende Forsmark respektive Laxemar, Ävrö och Simpevarp. Den linjära regressionen är relativt nära ett 1:1-samband mellan $\log(Q/dh_{eff})$ och $\log(T_T)$.



Figur 11 Figuren visar den linjära regressionen i rött av log(T_T) och log(dh_{eff}) för all data där en utvärdering av transmissiviteten utifrån ett transient förlopp finns tillgänglig. De lila punkterna är data från Forsmark medan de blå är från Laxemar, Ävrö och Simpevarp. Datapunkter från Gotland visas i orange. Den streckade linjen visar ett 1:1-samband.

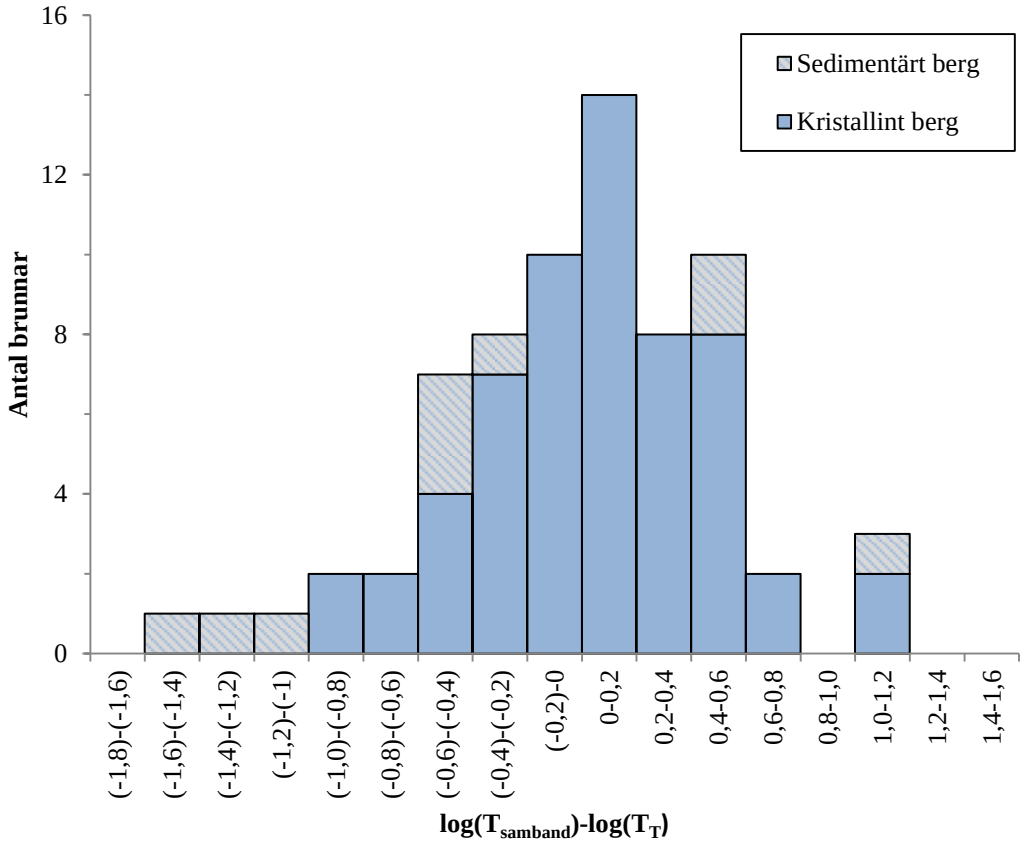
Med linjära regressioner utförda mellan log(Q/dh_{eff}) och log(T_T) för de olika datamängderna, och den effektiva avsänkningen antagen till 12,37 m, erhålls r2 och p-värden som visas i Tabell 11. Antalet punkter som används för regressionerna ges av n. För samtliga regressioner erhölls ett p-värde som är mindre än 0,05 vilket innebär att det existerar ett linjärt samband mellan log(Q/dh_{eff}) och log(T_T) i samtliga fall. En linjär regression med datapunkter för det sedimentära berget uppvisar högst p-värde, och även minst r^2-värde på 0,44. Starkast korrelation finns för data från Forsmark med r^2 på 0,80. Svagast korrelation finns för data avseende sedimentärt berg med r^2 på 0,44.

De borrhål som användes för att ta fram dh_{eff} som inte hade något värde på transmissivitet utvärderat från ett transient förlopp från provpumpning användes inte i den linjära regressionen. Dessa var Fårö Lansa 7:1, Hejnum Nygårds 2:1, Visby Bjärs 1:3, Fårö Hammars 1:10, Öja Stora Sutarve 1:2 från Gotland samt HFM18 från Forsmark.

Tabell 11 r^2 och p-värden för linjär regression mellan $\log(T_T)$ från provpumpningar av de olika datamängderna och $\log(Q/dh_{eff})$ från kapacitetsbestämning vid borrning. Det gemensamma värdet på dh_{eff} (12,37 m) användes för alla datamängder. n är antalet datapunkter.

Datamängd	**Linjär regression**		
	r^2	**p-värde**	***n***
All data	0,61	1,7E-15	69
Kristallin berggrund	0,72	3,5E-13	59
Forsmark	0,80	2,4E-13	36
Laxemar, Ävrö och Simpevarp	0,52	9,6E-05	23
Sedimentär berggrund (Gotland)	0,44	0,04	10

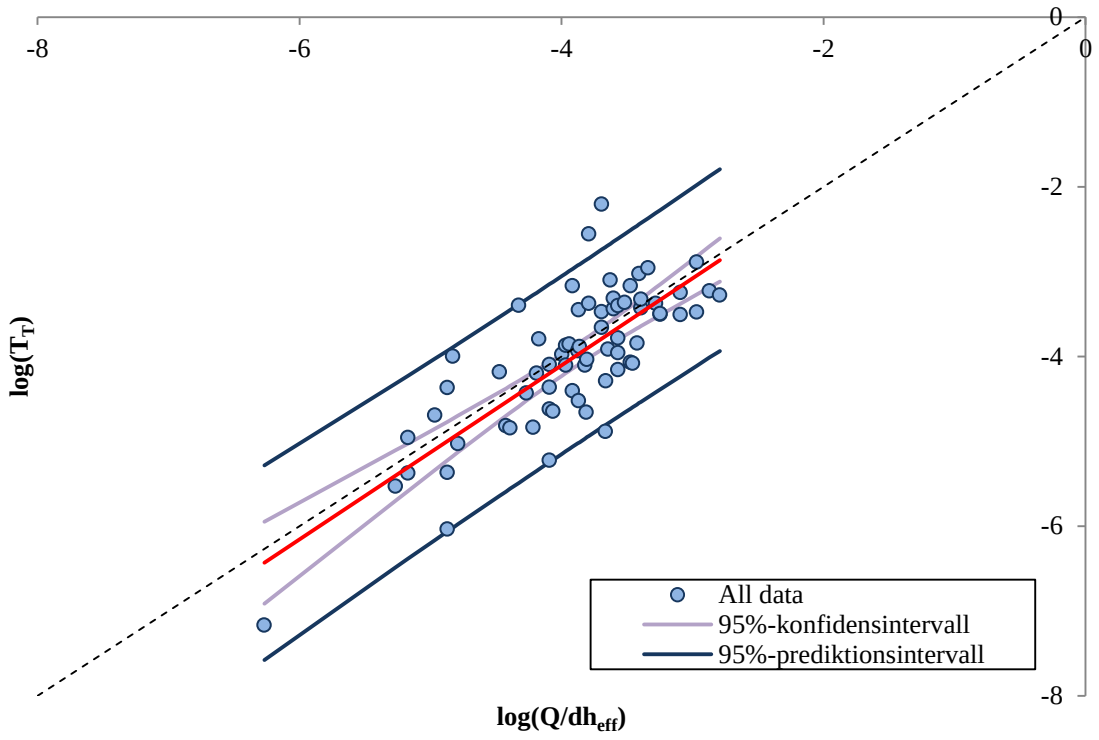
Figur 12 visar ett histogram över log-differens mellan transmissiviteten skattad från den linjära regressionen och transmissiviteten utvärderad från transienta förlopp från provpumpningar. Sammantaget visar all data en ungefärlig log-normalfördelning vilket legitimerar användandet av linjär regression. Majoriteten av datapunkterna finns inom 0,6 tiopotenser från regressionssambandet. Histogrammet visar en större spridning kring värdena för datapunkterna från Gotland, vars datamängd har en standardavvikelse på 0,85, jämförelsevis med data för den kristallina berggrunden som har en standardavvikelse på 0,42. Standardavvikelsen för samtlig data i histogrammet är 0,52.



Figur 12 Histogram över differensen mellan transmissiviteten beräknad utifrån den linjära regressionen för all tillgänglig data ($\log(T_{samband})$) och transmissiviteten utvärderad från transienta förlopp från provpumpningar ($\log(T_T)$) i log-skala. Data från den kristallina berggrunden visas i blått medan data från den sedimentära berggrunden visas i grått.

Skillnaden i dh_{eff} på 3 m (Tabell 10) är liten för det kristallina och sedimentära berget om värdet sätts i relation till att avsänkningen tidigare ansatts som borrhålsdjupet eller begränsats till max. 60 m från kapacitetsbestämningen. Dessutom är antalet datapunkter avseende det sedimentära berget begränsat. Därför har datamängderna för det kristallina och sedimentära berget inte separerats i vidare resultat.

Ett 95 % konfidens- och prediktionsintervall bestämdes för den linjära regressionen (Figur 13). Avsänkningen dh_{eff} antogs till det framräknade värdet 12,37 m för samtliga datapunkter. Konfidensintervallet visar i vilket intervall ett linjärt samband mellan parametrarna med 95 % sannolikhet bestäms inom, dvs. hur lutningen hos regressionslinjen kan variera. Konfidensintervallet är smalare där fler datapunkter finns vilket är förväntat. Intervallet inkluderar ett samband på 1:1 och indikerar att en skattning av transmissiviteten är rimlig att göra utifrån den specifika kapaciteten där det framtagna värdet på dh_{eff} används. En relativt större osäkerhet för konfidensintervallet finns för låga värden av $\log(Q/dh_{eff})$ där intervallet blir större. Prediktionsintervallet anger inom vilket område som ett värde i x-led kan skatta ett y-värde med 95 % sannolikhet. Prediktionsintervallet visar att skattningen av transmissivitet utifrån $\log(Q/dh_{eff})$ har gränser som är större än en tiopotens från den linjära regressionen. Detta visar att en stor spridning finns i skattningen av transmissivitet utifrån kapacitet.



Figur 13 95 % -konfidensintervall och 95 % -prediktionsintervall för den linjära regressionen mellan $\log(Q/dh_{eff})$ från kapacitetsbestämning vid borrning och $\log(T_T)$ från provpumpning. Den effektiva avsänkningen, dh_{eff}, antogs till 12.37 m. Den röda linjen är den linjära regressionen. De lila och blå linjerna visar konfidensintervall respektive prediktionsintervall. Den streckade linjen visar ett samband på 1:1.

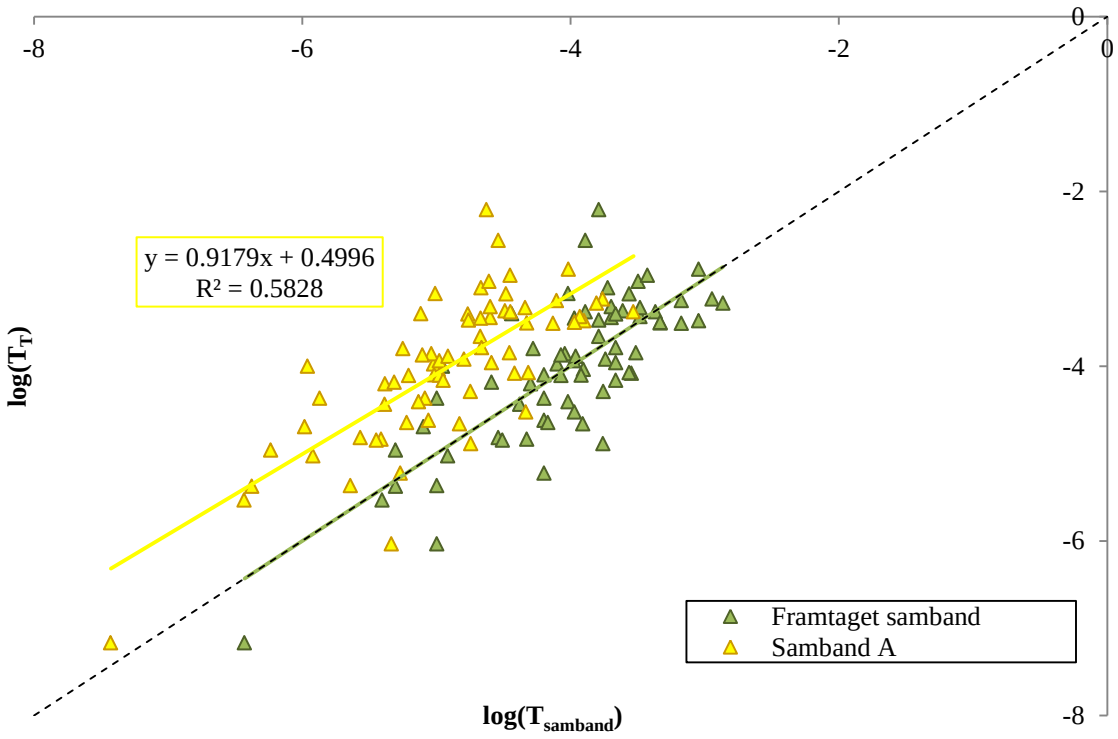
5.3 FRAMTAGNING AV SAMBAND MELLAN KAPACITET OCH TRANSMISSIVITET

Utifrån den effektiva avsänkningen på 12,37 m bestämdes följande samband transmissivitet och kapacitet.

$$T = 0{,}997 \cdot \left(\frac{Q}{12{,}37}\right)^{1{,}026} = 0{,}076 \cdot Q^{1{,}026} \qquad (4)$$

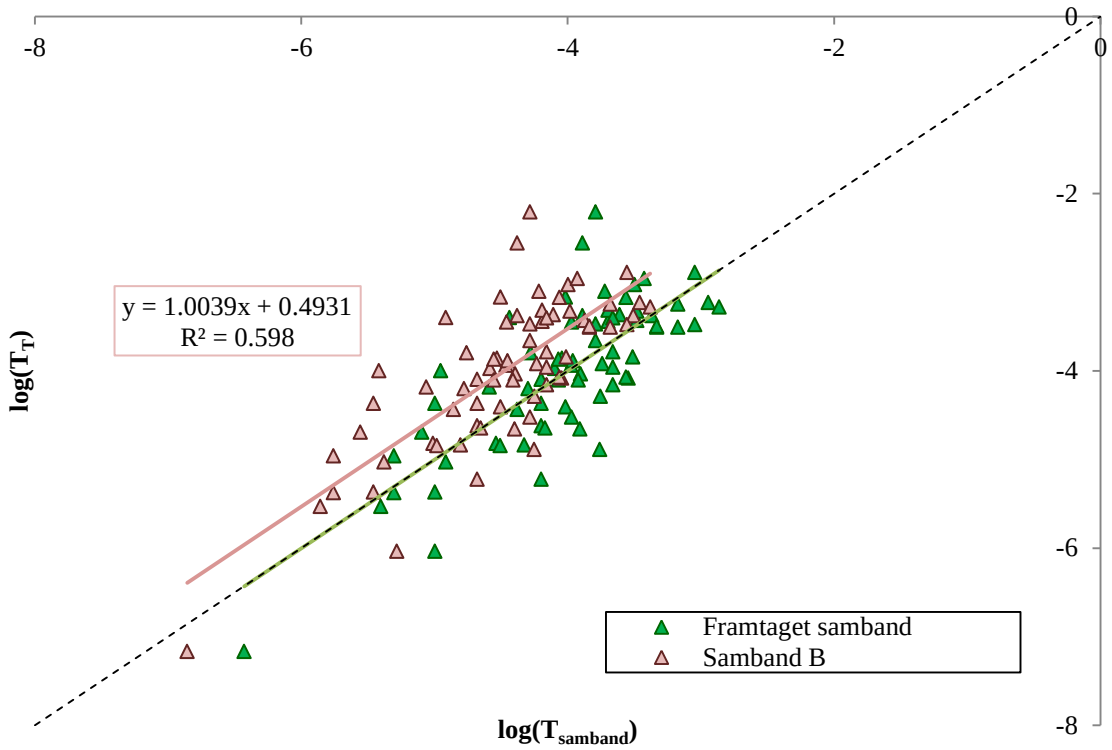
T – transmissivitet (m^2/s), Q – brunnens kapacitet från kapacitetsbestämning (m^3/s).

Sambandet motsvarar den linjära regressionen i Figur 11 och Figur 13. Det framtagna sambandet för skattning av transmissiviteten jämförs i Figur 14-17 med skattning av T från de olika befintliga sambanden (A-D) i Tabell 3. Vid jämförelse med när avsänkningen antas som den maximalt möjliga för borrhålet (samband A) ses att transmissiviteten underskattas jämfört med transmissiviteten utvärderad från transienta förlopp (Figur 14). Lutningen hos den linjära regressionen för datamängden indikerar att transmissiviteten underskattas i något högre grad för lågkonduktiva borrhål.



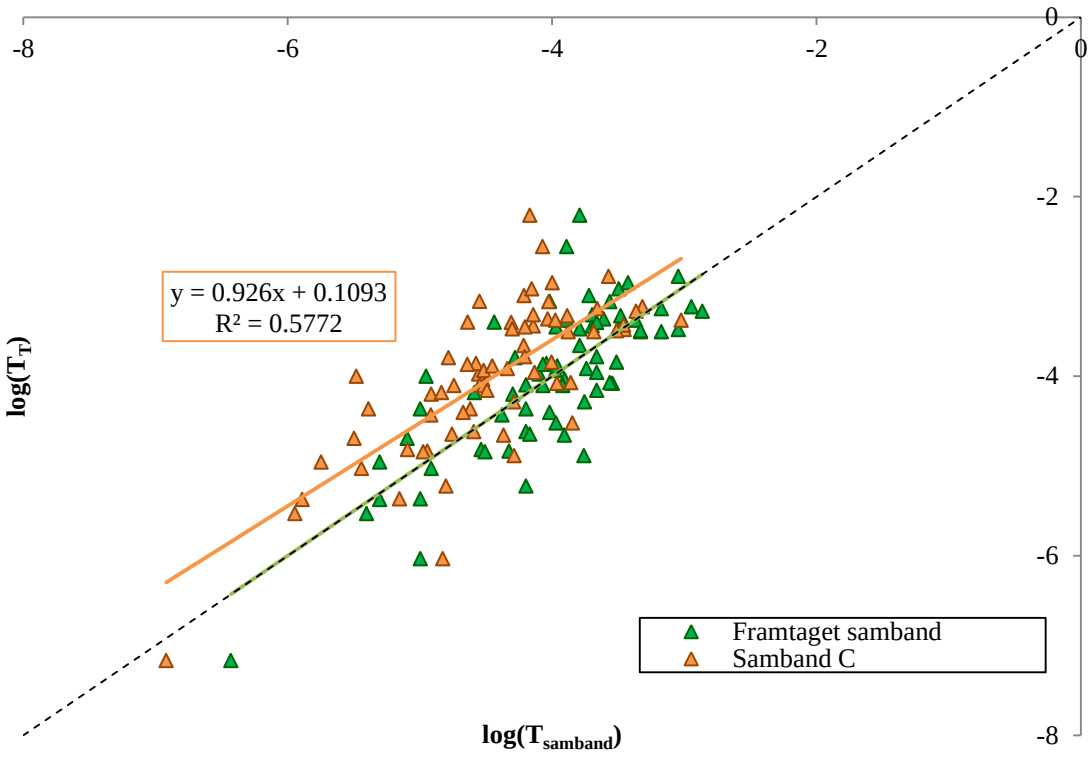
Figur 14 Skattning av transmissivitet, $\log(T_{samband})$, utifrån det framtagna sambandet (gröna datapunkter) samt samband A med max. avsänkning (gula datapunkter). Den skattade transmissiviteten plottas mot transmissivitet skattad från transienta förlopp från provpumpningar i log-skala, $\log(T_T)$, och linjära regressioner visas. Ett 1:1-samband visas av den streckade linjen.

I Figur 15 där det framtagna sambandets skattning av T jämförs med skattningen från SGU:s samband B är de linjära regressionerna mer lika varandra jämfört med Figur 13 med avseende på lutningen. Dock underskattar den linjära regressionen för sambandet från SGU transmissiviteten jämförelsevis med transmissiviteten utvärderad från transienta förlopp från provpumpningar.



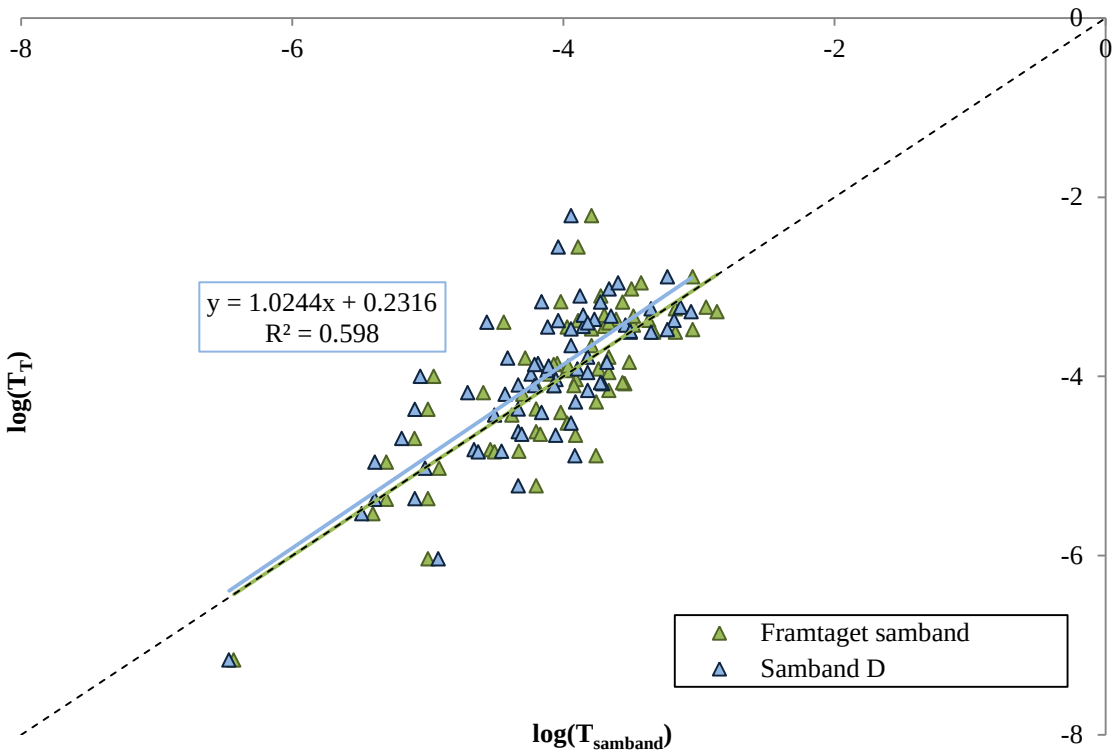
Figur 15 Skattning av transmissivitet, $\log(T_{samband})$, utifrån det framtagna sambandet (gröna datapunkter) samt samband B från SGU (rosa datapunkter). Den skattade transmissiviteten plottas mot transmissivitet skattad från transienta förlopp från provpumpningar i log-skala, $\log(T_T)$, och linjära regressioner visas. Ett 1:1-samband visas av den streckade linjen.

I Figur 16 visas jämförelsen mellan det framtagna sambandet och sambandet från Rhén m.fl. (1997) med den största möjliga avsänkningen antagen för varje borrhål (samband C). I detta fall skiljer sig lutningarna hos de båda sambanden åt. Den linjära regressionen mellan värdena från utvärderingar av transienta förlopp och transmissiviteter skattade med sambandet från Rhén m.fl. (1997) visar att skattningen underskattar transmissiviteten.



Figur 16 Skattning av transmissivitet, log($T_{samband}$), utifrån det framtagna sambandet (gröna datapunkter) samt samband C från Rhén m.fl. (1997) med antagen max. avsänkning (orangea datapunkter). Den skattade transmissiviteten plottas mot transmissivitet skattad från transienta förlopp från provpumpningar i log-skala, log(T_T), och linjära regressioner visas. Ett 1:1-samband visas av den streckade linjen.

Figur 17 visar att samband D från Rhén m.fl. (1997) underskattar transmissiviteten något när en jämförelse utförs med värdena från utvärderingar av provpumpningarnas transienta förlopp. Dock visar den linjära regressionen bättre resultat än för de andra studerade sambanden. Förklaringsgraden r^2 blev högre med begränsad avsänkning jämfört med den max. möjligt antagna i Figur 16.



Figur 17 Skattning av transmissivitet, log($T_{samband}$), utifrån det framtagna sambandet (gröna datapunkter) samt samband D från Rhén m.fl. (1997) med en begränsning av dh till max. 60 m (blå datapunkter). Den skattade transmissiviteten plottas mot transmissivitet skattad från transienta förlopp från provpumpningar i log-skala, log(T_T), och linjära regressioner visas. Ett 1:1-samband visas av den streckade linjen.

Trots en huvudsakligen stor skillnad mellan det framtagna sambandet (ekvation 22) och befintliga samband A-D uppvisar samtliga korrelationer statistisk signifikans med p-värden på under 0,05, dvs. att det existerar ett samband mellan log($T_{samband}$) och log(T_T) (Tabell 12). Förklaringsgraden för de linjära regressionerna är relativt lika på mellan 0,58–0,61, med högst förklaring av variansen för det framtagna sambandet. En begränsad avsänkning på 60 m ger högre r^2 än om avsänkningen antas vara den maximalt möjliga.

Tabell 12 r^2 och p-värden för den linjära regressionen mellan transmissivitet utvärderad från transienta förlopp från provpumpningar, log(T_T), och de olika sambandens skattade transmissivitet, log($T_{samband}$), i logskala.

Datamängd	**r^2**	**p-värde**
Framtaget samband	0,61	1,7E-15
Samband med max. avsänkning (A)	0,58	2,4E-14
Samband från SGU (B)	0,60	6,8E-15
Samband från Rhén m.fl. (1997) med max. avsänkning (C)	0,58	3,8E-14
Samband från Rhén m.fl. (1997) (D)	0,60	6,8E-15

6 DISKUSSION

6.1 PROVPUMPNINGAR I SEDIMENTÄRT BERG

Framtagen data för den sedimentära berggrunden grundades på provpumpningar som utfördes i 15 av de 19 borrhål som fanns att tillgå. Av de 15 enhålsprovpumpningar som utfördes kunde 10 utvärderas utifrån ett transient förlopp. På grund av det ringa antalet datapunkter som studerades kunde inga slutsatser dras om huruvida ett samband mellan kapacitet och transmissivitet skiljer sig åt mellan kristallint och sedimentärt berg.

Vid vissa av provpumpningarna sträcktes slangen när pumpen startades på grund av att den inte var tillräckligt åtdragen vid slangvindan. När pumpen startades drogs slangen åt vilket medförde att tryckgivaren hamnade något högre upp i borrhålet och därför mätte ett lägre totaltryck relativt totaltrycket innan pumpstart. Detta syntes i data för Visby Bjärs 1:3 och Fårö Hammars 1:10 som var två av de provpumpningar vars transienta förlopp inte kunde utvärderas. Det finns därför en risk att andra pumptester var påverkade av en initial slangsträckning, men att dessa var så pass små att de inte utgjorde en tydlig skillnad för avsänkningen. En sådan påverkan skulle ha större inverkan på provpumpningar med liten avsänkning. Eftersom lodningen som utfördes huvudsakligen styrkte det uppmätta totaltrycket bedömdes inte att slangsträckning hade någon betydande påverkan. Att en slangsträckning kunde påverka mätningen berodde på att tryckgivaren var fäst vid slangen som vatten pumpades upp genom. En bättre lösning hade varit att ha tryckgivaren lös i borrhålet alternativt att ha haft en extra tryckgivare lös för att mäta den initiala avsänkningen.

En svårighet vid utförandet av provpumpningarna var i de fall när en stor avsänkning gjordes. I takt med att lyfthöjden ökade var inte alltid flödet konstant utan minskade successivt. När flödet minskade avsevärt ökades i allmänhet pumpfrekvensen för att inte flödet skulle avstanna. I andra fall med stora avsänkningar fick pumpfrekvensen sänkas för att förhindra att grundvattennivån skulle sänkas förbi tryckgivaren samt att pumpen skulle pumpa torrt, t.ex. för Hejnum Nygårds 2:1 vars transienta förlopp inte kunde utvärderas.

Ändringarna i frekvens och flöde försvårade även utvärderingarna i AQTESOLV eftersom att det gav hack i tidsförloppet för avsänkningens derivata. Ett tydligt exempel var Lojsta Annex 1:1 där avsänkningen stannade av när en ändring i frekvens, som utfördes på grund av stor initial avsänkning, gav ett för lågt flöde. Dessa ändringar gav osäkerheter vid skattningen av transmissiviteten. I vissa fall antogs ett representativt flöde för provpumpning i utvärderingar av transienta förlopp ifall flödet var måttligt fladdrande. Antagandet underlättade utvärderingen men innebar en viss förenkling.

Flödet som avlästes manuellt på flödesmätaren kunde stundtals pendla, framförallt vid tillfällen då vattnet inte avbördades som planerat i ett näraliggande dike eller i en sänka, utan riktades till lägre liggande mark. Instabiliteten skulle kunna vara påverkad av turbulens från när vattnet släpptes ut i hinken i dessa fall. Sammantaget bedömdes dock denna påverkan på testresultatet som marginell.

Tiden för provpumpningarna bestämdes i fält genom att undersöka uppmätt data i AQTESOLV. I de fall där en möjlig dominerande flödesregim tolkades kunde testet avslutas. Tiden för enhålsprovpumpningarna var maximalt 150 min. Eftersom inte tiden för pumptesten var längre kan transmissiviteten utvärderad från provpumpning antas som att den gäller för berget närmast borrhålet. För Fårö Lansa 7:1, Visby Bjärs 1:3 och Öja Stora Sutarve 1:2 erhölls ingen entydig passning i AQTESOLV på grund av att modellpassningen inte konvergerade mot någon rimlig lösning. I dessa fall hade utrustning som möjliggjort en längre provpumpning genom pumpning med ett mindre flöde (och därmed en mindre avsänkning) förbättrat möjligheterna till entydiga kurvanpassningar för utvärderingar under transienta förhållanden.

En skillnad mellan analyserna i kristallin respektive sedimentär berggrund var att tiden för provpumpningarna skiljde sig åt. Provpumpningarna som gjordes för det kristallina berget pågick betydligt längre (ofta längre än ca 7 tim) än de på Gotland. En längre pumptid innebär att ett större område påverkas av tryckminskningen i borrhålet. Det är därför möjligt att skattningen av transmissivitet i det kristallina berget var mer representativ för berget i ett något större perspektiv medan provpumpningarna på Gotland främst visade hur bergets genomsläpplighet närmast borrhålen såg ut. Om flera radiella perioder uppträdde vid test i det kristallina berget kan detta endast haft en inverkan ifall en senare fas valts som representativ för testet. Därmed behövde inte detta ha utgjort någon effekt.

Skattningarna av transmissivitet för provpumpningarna på Gotland i AQTESOLV grundade sig i vilken modell som valdes. Utvärdering av transienta förlopp för provpumpningar involverar alltid ett visst mått av subjektivitet eftersom att det är upp till den enskilde hydrogeologen att identifiera dominerande flödesregim och välja modell för utvärdering. Detta kan ha medfört en viss osäkerhet kring huruvida det fanns skillnader i metod för att skatta transmissivitet mellan det kristallina och sedimentära berget i denna studie. Utvärderingen av testen på Gotland utfördes enligt samma metodik för både kvalitativ och kvantitativ utvärdering som använts vid SKB:s platsundersökningar. Sammantaget bör det inte ha funnits några avgörande skillnader i utvärderingarna mellan de olika platserna. Även tillvägagångssättet för att bestämma magasinskoefficient och skin-faktor utfördes på samma sätt som för data från SKB. Genom att magasinskoefficienten initialt ansattes till ett fixt värde undveks att kurvanpassningen utfördes med ett orimligt värde på S och en obefintlig skin-effekt, som teoretiskt sett skulle kunna ha gett samma kurvanpassning och skattning av T.

En del provpumpningar resulterade i relativt lågt negativt skin, lägre än -5 som ofta ses som en lägsta negativ gräns. Fyra borrhål - Fårö Hammars 1:35, Stånga Stallause 1:16, Norrlanda Annex 1:1:2 och Vamlingbo Austre 2:1 - hade enligt utvärdering av det transienta förloppet ett lägre värde på skin än -5 (se Tabell 9). De låga värdena indikerar att den hydrauliska kommunikationen närmast borrhålet var bättre än i berget i övrigt med antagande om radiell strömning. Detta skulle kunna ha sin orsak i lokala, konduktiva sprickor som skär borrhålet alternativt att borrningen påverkat berget närmast hålet mer avseende urspolning av sprickor, sprickbildning och

sprickregenerering. Skin-faktorn för det kristallina berget var generellt sett negativ. I datamängden för det kristallina berget fanns också ett tiotal borrhål som hade en lägre skin-faktor än -5 vilket gör att data från det sedimentära berget med lägre skin-faktorer ansågs användbara i studien.

Ett sätt för inkludering av fler datapunkter avseende både sedimentärt och kristallint berg hade varit om värden beräknade för stationära förhållanden, t.ex. transmissivitet utvärderade med Moyes ekvation (1967), använts i de fall där utvärderade värden av T från transienta förlopp saknades. Detta hade troligvis gett liknande resultat med tanke på att majoriteten av datapunkterna hade en transmissivitet av samma storleksordning för stationära och transienta förhållanden. Grunden till att värdena från analys av antagna stationära förhållanden inte inkluderades i studien var att en enhetlig utvärdering av transmissiviteten föredrogs.

6.2 ANALYS AV EFFEKTIV AVSÄNKNING

När transmissiviteten i berg ska uppskattas med hjälp av data i SGU:s brunnsarkiv behövs i allmänhet antaganden om avsänkningen från kapacitetsbestämningen vid borrning. I studien bestämdes ett teoretiskt värde på dh_{eff} utifrån den specifika kapaciteten från provpumpning och brunnens kapacitet. Detta med anledning av att den antagna avsänkningen nödvändigtvis inte behövde vara relaterad till varken borrhålslängd eller den verkliga avsänkningen som skulle kunna uppmätas vid tryckblåsningen. I och med att $dh_{eff}(i)$ för de enskilda borrhålen avseende samtliga data var oberoende av det vertikala borrhålsdjupet (Appendix D – Effektiv avsänkning som funktion av brunnsdjup) ansågs användandet av den effektiva avsänkningen vara rimlig. Kapacitetsbestämningen vid borrning och provpumpningen utfördes också relativt nära i tid vilket reducerat risken för ändring i specifik kapacitet på grund av ändringar i borrhålets och berggrundens hydrauliska förhållanden.

Analysen av den effektiva avsänkningen resulterade i en effektiv avsänkning på 13 m för datapunkterna i det kristallina berget (Tabell 10). Skillnaden för Forsmark respektive Laxemar, Ävrö och Simpevarp var endast 2 m vilket var en liten skillnad i avsänkning om den sattes i perspektiv till befintliga sambands antagna avsänkningar. Datapunkterna avseende Gotland gav en något lägre effektiv avsänkning på ca 10 m, som var mer osäker på grund av det få antal punkter som användes. Orsaken till varför de olika datamängderna erhöll olika dh_{eff} behandlades inte i denna studie.

Det framtagna värdet på dh_{eff} skiljer sig från den verkliga avsänkningen under kapacitetsbestämning. Djupet där tryckblåsningen utfördes i enskilda borrhål var betydligt större än det framtagna dh_{eff}. Under SKB:s platsundersökningar uppgavs avsänkningen inte varit mer än max. 40-60 m (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000). Den verkliga avsänkningen under kapacitetsbestämning i form av tryckblåsning kan mycket möjligt varit större än det framtagna dh_{eff}. En större avsänkning vid pumpning ökar risken för turbulent flöde och bergmekaniska deformationer nära borrhålet. Båda dessa faktorer skulle medföra en större tryckförändring nära borrhålet, relativt sett, än vad som skulle uppstå med en mindre avsänkning. Därmed skulle den verkliga

avsänkningen bli större än den framtagna dh_{eff}. Vid utvärdering av transienta förlopp skulle dessa effekter medföra en högre skin-faktor.

När $\log(Q/dh_{eff})$, med antagen effektiv avsänkning på 12,37 m, jämfördes med $\log(T_T)$ påvisades en statistiskt signifikant korrelation mellan variablerna för samtliga studerade datamängder (Tabell 11). Starkast korrelation erhölls för Forsmark och lägst för Gotland. Den erhållna linjära regressionen gav en rimlig skattning av transmissiviteten vid jämförelse med värdena från provpumpningar (Figur 11). Användandet av regressionen gav en något högre transmissivitet för sambandet jämfört med ett 1:1-samband. Huruvida skattningen av transmissivitet utifrån kapacitet och den effektiva avsänkningen hade olika precision för låga eller höga värden på kapaciteten kunde inte fastställas. Dels på grund av ett begränsat antal datapunkter med låg kapacitet, dels eftersom datapunkterna inte var jämnt fördelade över kapacitetsintervallet.

Vissa av borrhålen som användes vid framtagandet av dh_{eff} hade ingen skattning av transmissiviteten från utvärdering av transienta förlopp och användes därför inte i den linjära regressionen. Bland dessa var Fårö Hammars 1:10 och Hejnum Nygårds 2:1 vars specifika kapaciteter skattades utifrån manuell lodning respektive återhämtning vid provpumpning. Att dessa värden användes var på grund av det redan ringa antalet datapunkter som studerades avseende den sedimentära berggrunden. Eftersom den linjära regressionen av datapunkter med skattningar av transmissivitet från transienta förlopp gav en signifikant korrelation, dock med relativt låg förklaringsgrad för variansen med r^2 på 0,44, bedömdes inte användandet ha gett någon avgörande skillnad för dh_{eff} som beräknades för all data.

Det framtagna sambandet använde ett värde på den effektiva avsänkningen på 12,37 m vilket innebär att det fanns en signifikant skillnad från befintliga samband A-D där avsänkningen vanligtvis ansätts större. I och med den stora skillnaden i avsänkning, samt det ringa antalet datapunkter för det sedimentära berget, separerades inte data avseende kristallint och sedimentärt berg för framtagandet av ett samband mellan kapacitet och transmissivitet. Ett samband endast för det sedimentära berget hade inte genererat tillräcklig grund för att dra slutsatser ifrån. Anledningen till varför ett samband avseende endast den kristallina berggrunden inte utarbetades var för att ingen definitiv skillnad i dh_{eff} erhölls mellan bergartskategorierna. I Berggrens studie (1998) påvisades att brunnsdjupet förklarar variation i hydraulisk konduktivitet bäst, betydligt bättre än huruvida berget är kristallint eller sedimentärt. Det är därför möjligt att ett samband framtaget mellan specifik kapacitet och transmissivitet för sedimentärt berg inte skiljer sig i stora drag från ett samband för kristallint berg. Dock kan inte detta påvisas i denna studie.

Det framtagna konfidensintervallet inkluderade ett 1:1-samband mellan $\log(Q/dh_{eff})$ och $\log(T_T)$ (Figur 13). Intervallet visar att linjära regressioner mellan parametrarna kan variera en del gällande lutning, med större osäkerhet för låga värden på $\log(Q/dh_{eff})$.

Prediktionsintervallet visade att det fanns en stor spridning i hur transmissiviteten skattas vid användning av $\log(Q/dh_{eff})$. Tidigare studier från Wladis & Gustafson (1999) har visat att den specifika kapaciteten från tryckblåsning är en rimlig approximation av transmissivitet i berg inom en storleksordning. Detta var relativt överensstämmande med framtagna resultat (Figur 12) där 9 % av datapunkterna låg längre ifrån noll än en log-enhet ifrån ett exakt samband mellan det framtagna sambandet och skattningarna av transmissivitet från transienta förlopp. En storleksordning är dock en stor skillnad när det sätts i sammanhang med hydrogeologiska utredningar.

6.3 FRAMTAGNING AV SAMBAND MELLAN KAPACITET OCH TRANSMISSIVITET

Sambandet som bestämdes för skattning av transmissivitet utifrån kapacitet (ekvation 22) baserades på en effektiv, teoretisk avsänkning på 12,37 m för alla datapunkter. En jämförelse mellan det framtagna sambandet utfördes med befintliga samband mellan specifik kapacitetsbestämning och transmissivitet. Samtliga studerade samband A-D gav en lägre skattning av T jämfört med det framtagna sambandet (ekvation 22) Eftersom Figur 14-17 är i log-skala var skillnaden mellan de linjära regressionerna av större vikt än vad som kan indikeras i figurerna. I medeltal, om förhållandet mellan $T_{samband}$ och det framtagna sambandet studeras, underskattade SGU:s samband B transmissiviteten med en faktor 3. Samma faktor gällde för samband C från Rhén m.fl. (1997) när den största möjliga avsänkningen antogs. Motsvarande värde för den specifika kapaciteten med antagen maximal avsänkning (samband A) underskattades T med ca 8,7 ggr. I fallet där avsänkningen begränsades till max. 60 m vid beräkning av T utifrån samband D från Rhén m.fl. (1997) var underskattningen endast 1,4 ggr. Om avsänkningen begränsades var sambandet från Rhén m.fl. (1997) följaktligen i linje med det framtagna sambandets skattning. Båda bör därför ge liknande resultat för borrhål med ett maximalt djup på kring 60 m. Sammantaget visade resultatet att avsänkningen bör begränsas ytterligare än vad som tidigare antagits när den specifika kapaciteten approximeras till transmissiviteten, med undantag för det sistnämnda sambandet från Rhén m.fl. (1997) med begränsad avsänkning där endast en liten skillnad påvisades. Ett antagande där avsänkningen begränsades gav bättre skattningar av T än om ett antagande endast baserades på borrhålsdjupet (Tabell 12).

Resultaten visade att T troligvis underskattats vid användning av befintliga samband, t.ex. sambandet från SGU som använts i Ah-serien för bestämning av regionala parametrar av K utifrån medianvärden för brunnsdjup och skattad transmissivitet. Att transmissiviteten underskattas genom approximation av specifik kapacitet kan vara negativt i de fall där bergets hydrauliska egenskaper uppskattas tidigt i samband med t.ex. exploatering eller beräkning av påverkansområde vid grundvattenbortledning. Om den hydrauliska konduktiviteten beräknas utifrån en för låg transmissivitet och ett vattenflöde beräknas till en tunnel eller annan anläggning i berg skulle inströmningen kunna underskattas.

Med den underskattning av T som resultaten visade för samtliga studerade samband kan en relativt stor säkerhetsfaktor krävas för att inkludera osäkerheter när transmissiviteten och den hydrauliska konduktiviteten skattas utifrån den specifika kapaciteten från data i SGU:s brunnsarkiv. Sammantaget visade resultaten att felmarginalen för en enskild brunn kan vara stor. Ett exempel på att en stor avvikelse kan erhållas vid uppskattning av transmissivitet ur specifik kapacitet var borrhålen HFM25 och HFM28 i Forsmark vars kapaciteter vid borrning inte kunde uppmätas på grund av liten tillrinning ur berget, men som vid utvärderingar av transienta förlopp från provpumpning gav ett värde på relativt måttfull transmissivitet (T på $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ respektive $9{,}0 \cdot 10^{-6}$ m^2/s). På så sätt hade användning av information från kapacitetsbestämningen för att skatta T gett intrycket att borrhålen var helt torra trots att det fanns en viss genomsläpplighet och strömning i berget. För Öja Stora Sutarve 1:2, som hade en kapacitet på 0 liter/tim enligt brunnsprotokoll, lyckades inget värde på transmissiviteten från utvärdering av ett transient förlopp tas fram från provpumpning med den tillgängliga utrustningen. Däremot erhölls ett värde på $2{,}35 \cdot 10^{-6}$ m^2/s för den specifika kapaciteten under provpumpning, vilket tyder på att ett mindre inflöde till brunnen skedde som inte uppmättes vid kapacitetsbestämningen. Hur flödet uppmäts vid tryckblåsning är dessutom en grov skattning i och med att t.ex. en hink av känd volym fylls med vatten samtidigt som tiden mäts. Kapacitetsbestämningen i sig skulle därför också kunna bidra till felmarginalen.

Hejnum Nygårds 2:1, som hade en kapacitet på 9000 liter/tim vid borrning, gav istället mycket mindre vatten än förväntat. Den stora avsänkningen som utfördes vid pumpning medförde att ingen utvärdering av testets transienta förlopp kunde genomföras, utan återhämtningen användes för att uppskatta en specifik kapacitet på $1{,}16 \cdot 10^{-8}$ m^2/s från provpumpning. Att resultaten kunde skilja sig så pass mycket från det förväntade kan delvis ha en förklaring i en viss variation i grundvattennivåer över tid. Vid tiden för provpumpningarna var grundvattennivån generellt sett högre än vid borrning. Flera av borrhålen var t.ex. artesiska vilket inte nämndes i respektive borrprotokoll. De brunnar som gav mycket vatten ur berget hade möjligtvis sprickor som var vattenledande som inte var det under tillfället för tryckblåsning. Dock var troligtvis skillnaden i grundvattennivåer relativt liten jämfört med borrhålslängden, vilket gör att ingen betydande skillnad bör ha inverkat på den uppmätta kapaciteten under kapacitetsbestämningen. Tiden mellan borrning och kapacitetsbestämning av de använda brunnarna på Gotland och de utförda provpumpningarna var relativt liten varför inga större skillnader i den hydrauliska kommunikationen mellan berget närmast borrhålet och berggrunden i stort bör ha skett.

För att kunna dra slutsatser om hur information från SGU:s brunnsarkiv kan användas för att bestämma t.ex. bergets transmissivitet måste en del aspekter av studiens använda borrhål beaktas. Vid borrning av brunnar är syftet t.ex. att få ett visst vattenuttag. Själva placeringen av borrhålet styrs av anläggarens bedömning om var det finns bäst förutsättningar för vatten. Placeringen kan vara begränsad till en viss fastighet, och metoden för tryckblåsningen skulle kunna variera mellan borrare. De slutsatser som dras

från det kristallina berget är anpassade efter borrhål som borrats i syfte att undersöka berget inför slutförvar av använt kärnbränsle. SGU:s borrhål som använts på Gotland hade också som syfte att studera berggrunden varpå en viss skillnad kan finnas gällande placering. Ett borrhål i Forsmark kan t.ex. ha borrats för att undersöka en viss struktur i berget. Samtliga av de undersökta borrhålen är endast rensade med tryckblåsning och inte påverkade genom t.ex. högtrycksspolning med manschett där berget påverkats för att maximera ett vattenuttag vilket kan vara fallet för vattenbrunnar i SGU:s brunnsarkiv. Genom dessa faktorer kan det finnas vissa skillnader i resultat gällande kapacitet och antaganden kring avsänkning om studien genomförts i vattenbrunnar eller borrhål för andra syften och skapar en osäkerhet i hur studiens resultat kan tillämpas för data från brunnsarkivet.

Spridningen kring den linjära regressionen mellan $\log(T_T)$ och $\log(Q/dh_{eff})$ var tydligt större för datapunkterna från Gotland (Figur 12). Även skillnaden mellan värdena från utvärderingar under transienta förhållanden och transmissiviteten beräknad med det framtagna sambandet gav en betydligt större avvikelse för data avseende sedimentärt berg. Orsaken till den större spridningen för mätpunkterna vid jämförelse med det kristallina berget utreddes inte. Antalet mätpunkter på Gotland var relativt få i jämförelse med tillgänglig data från Forsmark, Laxemar, Ävrö och Simpevarp, vilket troligtvis bidrog till att inga direkta slutsatser kunde dras för det sedimentära berget. Provpumpningarna med tillhörande utvärdering utfördes med i stort sett samma metodik vilket rimligtvis medförde att ingen avgörande skillnad fanns gällande data för de utvärderingarna av transienta förlopp. Däremot var det svårare att klargöra om kapacitetsbestämningarna utförda vid borrningarna i samband med SKB:s platsundersökningar och på Gotland utfördes på samma sätt. Precisionen för kapacitetsbestämningarna kan också ha varit olika. Det är allmänt vedertaget att ambitionsnivån gällande SKB:s undersökningar var mycket hög, vilket skulle kunna innebära att kapacitetsbestämningarna vid borrning var mer noggrant utförda än normalt i branschen. Spridningen i data som tydligt syntes avseende Gotland skulle på så sätt kunna vara mer kännetecknande för branschen som helhet. Om det var fallet skulle en större spridning rimligtvis också erhållas vid användning av data från SGU:s brunnsarkiv för skattning av transmissivitet.

För att avgöra ifall en approximation av T utifrån kapacitetsbestämning vid borrning skiljer sig åt för sedimentärt och kristallint berg bör vidare studier genomföras med betydligt större datamängd för den sedimentära berggrunden. Provpumpningar skulle t.ex. kunna genomföras i brunnar från SGU:s brunnsarkiv som syftar till vattenuttag för att undersöka om en signifikant skillnad existerar för hur T bör skattas i dessa mer påverkade brunnar. Studien påvisade dock att en bättre skattning av T antingen bör inkludera en relativt större säkerhetsmarginal vid användandet av befintliga samband samt att avsänkningen bör begränsas. Ifall ett större antal brunnar studeras i ett område skulle T kunna skattas från dessa, dock med vetskapen om att skattningen av T för en enskild brunn kan skilja sig stort.

7 SLUTSATS

Det framtagna sambandet $T = 0{,}076 \cdot Q^{1{,}026}$ bedömdes ge den bästa skattningen av transmissivitet utifrån kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning, vid jämförelse med befintliga samband. Ingen skillnad i hur transmissivitet bör skattas för kristallint och sedimentär berggrund framkom i studien på grund av det få antalet datapunkter avseende det sedimentära berget.

Befintliga samband för skattning av transmissivitet utifrån kapacitet från borrning har troligtvis underskattat transmissivitet vilket jämförelsen med studerade värden från utvärderingar av transienta förlopp från provpumpningar påvisade. Framförallt påverkade antagande om avsänkning sambandet mellan utvärderad transmissivitet från provpumpning och kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning. En stor skillnad erhölls gällande hur avsänkningen lämpligast bör antas gällande sambandet mellan utvärderad transmissivitet från provpumpning och kapacitet från kapacitetsbestämning vid borrning. Med ett antagande om att den specifika kapaciteten var konstant oavsett storlek på avsänkning kunde en teoretisk, effektiv avsänkning på 12,37 m bestämmas för all data.

Spridningen kring samtliga studerade samband var stor, vilket innebär att relativt stora säkerhetsmarginaler bör användas vid skattning av transmissivitet utifrån information i SGU:s brunnsarkiv, speciellt om endast ett fåtal brunnar kan användas, i och med vetskapen om att en enskild brunns kapacitet kan avvika betydligt från det framtagna sambandet.

8 REFERENSER

Agarwal, R.G., Al-Hussainy, R., Ramey, H.J., 1970. ”An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: I. Analytical Treatment”. *Soc. Pet. Eng. J*. No. 10:3, ss. 279–290.

Alm, P.-G., 2017. ”Loggingrapport. Borrhål: Diverse borrhål på Gotland 2016”. Intern rapport No. 423–2454/2016. Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola. Sveriges Geologiska Undersökning.

Alm, P.-G., 2014. ”Loggingrapport. Borrhål 1,2,3,4,5,6 och 9”. Intern rapport No. 423–2056/2014. Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola. Sveriges Geologiska Undersökning.

AQTESOLV, n.d. e. ”Dougherty-Babu (1988) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer”. Hjälpdokument till programvaran.

AQTESOLV, pro., ver 4.5, n.d. a. ”Derivative Analysis”. Hjälpdokument till programvaran.

AQTESOLV, pro., ver 4.5, n.d. b. ”Automatic curve matching”. Hjälpdokument till programvaran.

AQTESOLV, pro., ver 4.5, n.d. c. ”Barker (1988) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer”. Hjälpdokument till programvaran.

AQTESOLV, pro., ver 4.5, n.d. d. ”Moench (1984) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer”. Hjälpdokument till programvaran.

AQTESOLV, pro., ver 4.5, n.d. f. ”Wellbore skin”. Hjälpdokument till programvaran.

Ask, H., 2007. *Oskarshamn site investigation. Percussion drilling of boreholes HLX38, HLX39, HLX40, HLX41, HLX42 and HLX43 for lineament investigation.* No. P-06-291. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Ask, H., 2006. *Oskarshamn site investigation. Percussion drilling of boreholes HLX36 and HLX37 for investigation of lineament NS001.* No. P-05-275. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Ask, H., Samuelsson, L.-E., Zetterlund, M., 2005a. *Oskarshamn site investigation. Percussion drilling of boreholes HLX21, HLX22, HLX23, HLX24, HLX25, HLX30, HLX31 and HLX33 for investigation of lineament EW007*. No. P-05-55. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Ask, H., Samuelsson, L.-E., Zetterlund, M., 2005b. *Oskarshamn site investigation. Percussion drilling of boreholes HLX15, HLX26, HLX27, HLX28, HLX29 and HLX32 for investigation of lineament NW042.* No. P-04-235. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Barker, J., 1988. ”A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock”. *Water Resour. Res.* No. 24:10, ss. 1796–1804.

Berggren, M., 1998. ”Hydraulic conductivity in Swedish bedrock estimated by means of geostatistics”. Royal Institute of Technology, Uppsala.

Carlsson, L., Gustafson, G., 1991. *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*. Statens råd för byggnadsforskning; Svensk byggtjänst (Stockholm; Solna).

Claesson, L.-Å., Nilsson, G., 2006a. *Forsmark site investigation. Drilling of percussion boreholes HFM25-HFM27, HFM29-HFM32, and HFM38 for investigation of different lineaments and to be used as monitoring wells*. No. P-06-166. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Claesson, L.-Å., Nilsson, G., 2006b. *Forsmark site investigation. Drilling of monitoring wells HFM23 and HFM28 at drill site DS9 as well as HFM24 and SFM0080 at drill site DS10*. No. P-05-278. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Claesson, L.-Å., Nilsson, G., 2004. *Forsmark site investigation. Drilling of a flushing water well, HFM06, and two groundwater monitoring wells, HFM07 and HFM08, at drillsite DS3*. No. P-03-58. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Claesson, L.-Å., Nilsson, G., 2003. *Forsmark site investigation. Drilling of a flushing water well, HFM05, and a groundwater monitoring well, HFM04, at drillsite DS2*. No. P-03-51. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Thulin Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K., Curtis, P., 2015. *SkyTEM-undersökningar på Gotland*. Sveriges geologiska undersökning, Uppsala.

Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Schoning, K., 2017. *SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2*. Opublicerad rapport. Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala.

Dershowitz, W., Doe, T., 1997. ”Analysis of heterogenously connected rock masses by forward modeling of fractional dimension flow behavior”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* No. 34:61, ss. 3–4.

Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1998. *Physical and chemical hydrogeology*. 2nd ed. Wiley, New York.

Dougherty, D.E., Babu, D.K., 1984. ”Flow to a Partially Penetrating Well in a Double-Porosity Reservoir”. *Water Resour. Res.* No. 20:8, ss. 1116–1122.

Eijkelkamp, 2017. ”Submersible pump Grundfos MP1/Redi-Flo2. User manual”. Eijkelkamp Soil & Water. https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=M1227E_Grundfos_MP_1_and_RediFlo2_pump_9b65.pdf (2017-05-09)

Eijkelkamp, u.å. ”OptidriveTM User Guide: IP20 & IP66 (NEMA4X). Revision 1.03”. Eijkelkamp Soil & Water. https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=M122746e_Frequency_converter_eb63.pdf (2017-05-09)

Follin, S., Årebäck, M., Axelsson, C-L., Stigsson, M., Jacks, G., 1998. *Förstudie Oskarshamn. Grundvattnets rörelse, kemi och långsiktiga förändringar*. No. R-98-55. Svensk Kärnbränslehantering, Stockholm.

Gentzschein, B., Levén, J., Follin, S., 2007. *A comparison between well yield data from the site investigation in Forsmark and domestic wells in northern Uppland*. No. P-06-53. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Grandin, U., 2003. ”Dataanalys och hypotesprövning för statistikanvändare”. Naturvårdsverket, Uppsala. http://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/miljoovervakning/handledning/dataanalys-och-hypotesprovning-for-statistikanvandare-uppd-2012-01-30.pdf (2017-04-01)

Gustafson, G., 2009. *Hydrogeologi för bergbyggare*. Formas, Värnamo.

Gustafsson, E., Ludvigson, J.-E., 2005. *Oskarshamn site investigation. Combined interference test and tracer test between KLX02 and HLX10.* No. P-05-20. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Hjerne, C., Ragvald, J., Palmfjord, E., 2016. *KBS3H project/DETUM Large fractures: Hydraulic interference tests in boreholes K03009F01 and K08028F01*. No. P-15-04. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Horne, R.N., 1995. *Modern well test analysis: a computer-aided approach, 2nd ed*. Petroway, Palo Alto, CA.

HydroSOLVE, Inc., n.d. AQTESOLV. Professional, version 4.5. HydroSOLVE, Inc. http://aqtesolv.com/

ISOIL Industria, u.å. ”ISOMAG: MS501. Instruction manual”. http://archivio.isoil.eu/MS501_EN_DS022.pdf (2017-05-09)

ISOIL Industria, u.å.” ISOMAG: Data sheet MV110. http://archivio.isoil.eu/MV110.pdf (2017-05-09)

Juston, J., Johansson, P.-O., Levén, J., Follin, S., 2006. *Analysis of meteorological, hydrological and hydrogeological monitoring data, December 2002-July 2005.* t No. R-06-49. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Knutsson, G., Morfeldt, C.-O., 2002. *Grundvatten: teori & tillämpning.* 3:e utg. Svensk byggtjänst, Stockholm.

Körner, S., Wahlgren, L., 2015. *Statistiska metoder,* 3:e uppl. Studentlitteratur, Lund.

Kruseman, G.P., de Ridder, N.A., 1991. *Analysis and evaluation of pumping test data*. 2nd ed. ILRI publication. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.

Ludvigson, J.-E., Källgården, J., Hjerne, C., 2004. *Forsmark site investigation: Pumping tests and flow logging. Boreholes HFM17, HFM18 and HFM19*. No. P-04-72. Svensk Kärnbränslehantering, Stockholm.

Microsoft Office, u. å. ”Define and solve a problem by using Solver”. Microsoft. https://support.office.com/en-us/article/Define-and-solve-a-problem-by-using-Solver-9ed03c9f-7caf-4d99-bb6d-078f96d1652c?ui=en-US&rs=en-US&ad=US (2017-05-12)

Misstear, B.D.R., Banks, D., Clark, L., 2006. *Water wells and boreholes*. John Wiley & Sons, Chichester, England ; Hoboken, NJ.

Moench, A.F., 1985. ”Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers”. *Water Resour. Res.* Vol. 21:8, ss. 1121-1131.

Moye, D., 1967. ”Diamond drilling for foundation exploration”. *Civil Engineering Trans*. ss. 95-100. Institute of Engineers, Australia.

Olofsson, B., Jacks, G., Knutsson, G., Thunvik, R., 2001. ”Grundvatten i hårt berg - en analys av kunskapsläget”. I: Kunskapsläget i kärnavfallsområdet 2001. Statens offentliga utredningar No. 2001:35. KASAM, Stockholm.

Pousette, J., Müllern, C.-F., Rurling, S., Thunholm, B., 2000. *Beskrivning till kartan över grundvattnet i Örebro län*. Sveriges Geologiska Undersökning. Serie Ah. Uppsala.

Prevent Arbetsmiljö, 2008. ”Borrningssäkerhet - en guide för säkrare borrning i jord och berg”. Uppl. 2:1. Thomas Broberg Grafiska, Stockholm. http://www.prevent.se/globalassets/documents/prevent.se/bransch/industri/gruv/prevent_borrguide_2009.pdf (2017-04-28)

Rahm, N., Enachescu, C., 2004. *Oskarshamn site investigation. Hydraulic testing of percussion drilled lineament boreholes on Ävrö and Simpevarp, 2004*. No. P-04-287. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Renard, P., Glenz, D., Mejias, M., 2009. ”Understanding diagnostic plots for well-test interpretation”. *Hydrogeol. J.* No. 17:3, ss. 589–600.

Rhén, I., Forsmark, T., Forssman, I., Zetterlund, M., 2006. *Evaluation of hydrogeological properties for Hydraulic Conductor Domains (HCD) and Hydraulic Rock Domains (HRD).* No. R-06-22. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Rhén, I., Gustafson, G., Stanfors, R., Wikberg, P., 1997. *Äspö HRL, Geoscientific evaluation 1997/5, Models based on site characterisation 1986-1995.* No. TR-97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

SGU, 2016. ”Normbrunn -16. Vägledning för att borra brunn”. Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala.

SGU, 2015. ”Produktbeskrivning: Brunnar”. Sveriges Geologiska Undersökning. http://resource.sgu.se/dokument/produkter/brunnar-beskrivning.pdf (2017-04-28)

SGU, u.å. ”Sveriges berggrund”. Sveriges Geologiska Undersökning. http://www.sgu.se/om-geologi/berg/sveriges-berggrund/ (2017-01-19)

Sigurdsson, O., Ask, H., Zetterlund, M., 2005. *Oskarshamn site investigation. Percussion drilling of boreholes HLX34 and HLX35.* No. P-05-237. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Solinst®, 2017. ”User Guide. Levelogger Series - Software Version 4.3.0”. ©2017 Solinst Canada Ltd: Kanada. https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levelogger-series/operating-instructions/user-guide/3001-user-guide.pdf (2017-02-27)

Spane, F.A., Wurstner, S.K., 1993. ”DERIV: A computer program for calculating pressure derivates for use in hydraulic test analysis”. *Ground Water*. No. 31:5, ss. 814–822.

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017a. ”SICADA”. Svensk Kärnbränslehantering AB. Leveransnummer SKBdata-17-019.

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017b. Beskrivning av aktivitetstyp ”Capacity tests (HY580)”. Svensk Kärnbränslehantering AB. Leveransnummer SKBdata-17-019.

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017c. Beskrivning av aktivitetstyp” Pumping tests - submersible pump (HY610)”. Svensk Kärnbränslehantering AB. Leveransnummer SKBdata-17-019.

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015. ”Vår generation måste ta om Sveriges kärnavfall”. Svensk Kärnbränslehantering AB. http://www.skb.se/det-har-ar-skb/vart-uppdrag (2017-01-19)

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010. *Referensområden, en sammanställning och utvärdering av typområdesundersökningar med mera.* No. P-10-46. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000. *Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret.* No. R-00-30. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Wahlgren, C.-H., Mellqvist, C., Bovin, K., Jelinek, C., Persson, L., Thunholm, B., Wåhlén, H., 2015. ”Grundvatten i kristallin berggrund, en pilotstudie baserad på SGU:s data”. SGU rapport No. 2015:31. Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala.

Wladis, D., Gustafson, G., 1999. ”Regional characterisation of hydraulic properties of rock using air-lift data”. *Hydrogeol. J.* No. 7:2, ss. 168–179.

Yan, X., Su, X., 2009. *Linear regression analysis: theory and computing*. World Scientific, Singapore; Hackensack, NJ.

Muntliga källor

Hjerne, Calle. Projektledare vid Avdelningen för mark och grundvatten, SGU, Uppsala. Muntlig kommunikation, 2017-01-25.

APPENDIX A – DATA FÖR ANALYS I KRISTALLINT BERG

DATA FRÅN BORRNING

I Tabell A.1 visas använd data från SICADA från borrning samt kapacitetsbestämning vid borrning. På grund av att antingen Q eller utvärderat T_T inte fanns har borrhålen HLX04, HLX10, HFM25 samt HFM28 inte tagits med i några beräkningar.

Tabell A.1 Använd data från SKB:s databas SICADA (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017a) samt SKB:s borrhålsrapporter för analys i kristallint berg. Referenser i form av borrhålsrapporter avser SKB:s rapportnummer. Borrhålen med längd och vertikalt djup (m) samt kapacitet vid borrning Q (liter/min) med respektive referenser och ev. kommentarer. De borrhål med kapaciteter märkta med * har ej använts i analys där kapaciteten används.

Borrhål	Borrhåls-längd (m)	Vertikalt djup (m)	Kapacitet vid borrning, Q (liter/min)	Referens	Kommentar
HAV11	220,5	190,2	116	SICADA	
HAV12	157,8	135,0	75	SICADA	
HAV13	142,2	121,6	150	SICADA	
HAV14	182,4	158,6	85	SICADA	
HLX04	125,0	118,1	*	SICADA	Ej mätbart flöde
HLX10	85,0	79,2	*	SICADA	Saknas
HLX14	115,9	107,5	60	SICADA	
HLX18	181,2	152,6	161	SICADA	
HLX20	202,2	175,8	28	SICADA	
HLX21	150,3	119,2	225	(Ask m.fl., 2005a)	
HLX24	175,2	139,7	175	(Ask m.fl., 2005a)	
HLX25	202,5	180,9	112	(Ask m.fl., 2005a)	
HLX27	164,7	132,8	115	(Ask m.fl., 2005b)	
HLX28	154,2	126,2	185	(Ask m.fl., 2005b)	
HLX32	162,6	132,0	8	(Ask m.fl., 2005b)	
HLX33	202,1	178,4	168	SICADA	
HLX35	151,8	126,4	185	(Sigurdsson m.fl., 2005)	
HLX37	199,8	166,2	40	(Ask, 2006)	
HLX38	199,5	161,0	99	(Ask, 2007)	
HLX39	199,3	171,5	11	(Ask, 2007)	
HLX42	152,6	127,7	10	SICADA	
HLX43	170,6	137,3	280	SICADA	
HSH02	200,0	185,1	4	SICADA	
HSH03	201,0	197,6	45	SICADA	
HSH05	200,2	169,7	5	SICADA	
HFM01	200,2	197,1	48	SICADA	
HFM02	100,0	99,9	1000	SICADA	
HFM03	26,0	26,0	388	SICADA	
HFM04	221,7	218,0	80	(Claesson & Nilsson, 2003)	
HFM05	200,1	197,6	200	(Claesson & Nilsson, 2003)	
HFM06	110,7	109,9	800	(Claesson & Nilsson, 2004)	
HFM08	143,5	142,4	800	(Claesson & Nilsson, 2004)	

HFM09	50,3	46,5	300	SICADA	
HFM10	150,0	139,1	600	SICADA	
HFM11	182,4	125,5	60	SICADA	
HFM12	209,6	143,7	30	SICADA	
HFM13	175,6	152,5	420	SICADA	
HFM14	150,5	131,2	600	SICADA	
HFM15	99,5	69,4	420	SICADA	
HFM16	132,5	131,7	1200	SICADA	
HFM17	210,7	207,7	90	SICADA	
HFM18	180,7	147,8	100	SICADA	
HFM19	185,2	147,6	150	SICADA	
HFM20	301,0	300,6	200	SICADA	
HFM21	202,0	157,4	90	SICADA	
HFM22	222,0	157,1	200	SICADA	
HFM23	211,5	77,0	10	SICADA	
HFM24	151,4	133,0	200	SICADA	
HFM25	187,5		*	(Claesson & Nilsson, 2006)	Ej mätbart flöde
HFM26	202,7	146,8	5	SICADA	
HFM27	127,5	117,4	260	SICADA	
HFM28	151,2		*	(Claesson & Nilsson, 2006b)	Saknas
HFM29	199,7	182,4	0,4	SICADA	
HFM30	200,8	173,7	80	SICADA	
HFM32	202,7	199,4	290	SICADA	
HFM33	140,2	113,0	300	SICADA	
HFM34	200,8	163,7	340	SICADA	
HFM35	200,8	152,3	50	SICADA	
HFM36	152,6	118,7	60	SICADA	
HFM37	191,8	170,6	12	SICADA	
HFM38	200,8	142,9	102	SICADA	
HFR101	209,3	189,5	60	SICADA	
HFR105	200,5	181,2	64	SICADA	
HFR106	190,4	154,4	162	SICADA	

DATA FRÅN PROVPUMPNINGAR

I Tabell A.2 visas använd data från SICADA för enhålsprovpumpningar. På grund av att antingen Q eller utvärderat T_T inte fanns har borrhålen HLX04, HLX10, HFM25 samt HFM28 inte tagits med i några beräkningar.

Tabell A.2 Använd data från SKB:s databas SICADA (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017a) samt rapporter för analys i kristallint berg för öppna enhålsprovpumpningar med dränkbara pumpar. Q_p är det sista uppmätta pumpflödet vid test. Den specifika kapaciteten Q_p/dh_p var angiven i SICADA, och utifrån den har värdena på avsänkningen dh_p (m) beräknats. Dessutom visas T_M (m^2/s) från utvärdering av stationärt förlopp, T_T (m^2/s) från utvärdering av transienta förlopp samt referenser. De borrhål med T_T märkta med * har ej använts i analys där transmissiviteten utvärderad utifrån ett transient förlopp används.

Borrhål	Q_p (m^3/s)	Q_p/dh_p (m^2/s)	dh_p (m)	T_M (m^2/s)	T_T (m^2/s)	Referens
HAV11	1,19E-03	2,89E-04	4,1	3,85E-04	9,20E-05	SICADA
HAV12	1,06E-03	1,31E-04	8,1	1,66E-04	1,06E-04	SICADA
HAV13	1,15E-03	2,30E-04	5,0	2,90E-04	2,20E-04	(Rahm & Enachescu, 2004)
HAV14	1,06E-03	1,63E-04	6,5	2,10E-04	1,39E-04	SICADA
HLX04	1,00E-05	8,00E-08	125,0	1,00E-07	*	SICADA
HLX10	1,20E-03	1,60E-04	7,5	3,30E-04	1,60E-04	(Gustafsson & Ludvigson, 2005)
HLX14	6,42E-04	1,19E-04	5,4	1,44E-04	7,99E-05	SICADA
HLX18	1,00E-03	3,31E-05	30,2	4,26E-05	1,30E-05	SICADA
HLX20	3,10E-04	3,10E-05	10,0	4,06E-05	1,52E-05	SICADA
HLX21	1,07E-03	3,50E-04	3,1	4,75E-04	4,32E-04	SICADA
HLX24	1,89E-03	5,27E-04	3,6	6,78E-04	7,90E-04	SICADA
HLX25	1,67E-03	1,56E-04	10,7	2,05E-04	7,88E-05	SICADA
HLX27	1,52E-03	6,40E-05	23,8	8,20E-05	2,20E-05	SICADA
HLX28	1,06E-03	3,05E-04	3,5	3,87E-04	3,62E-04	SICADA
HLX32	1,95E-04	2,04E-05	9,6	2,59E-05	2,03E-05	SICADA
HLX33	1,07E-03	1,66E-04	6,4	2,18E-04	1,21E-04	SICADA
HLX35	9,97E-04	2,72E-04	3,7	3,70E-04	4,82E-04	SICADA
HLX37	2,42E-04	5,44E-05	4,4	7,10E-05	3,68E-05	SICADA
HLX38	1,10E-03	1,48E-04	7,4	2,07E-04	1,16E-04	SICADA
HLX39	3,93E-04	5,80E-05	6,8	7,80E-05	1,00E-04	SICADA
HLX42	1,11E-03	3,40E-05	32,6	7,20E-05	4,30E-05	SICADA
HLX43	1,05E-03	2,66E-04	3,9	3,41E-04	1,43E-04	SICADA
HSH02	7,58E-05	4,03E-06	18,8	5,30E-06	2,94E-06	SICADA
HSH03	2,85E-04	2,17E-05	13,1	2,83E-05	1,46E-05	SICADA
HSH05	6,95E-05	5,20E-06	13,4	6,81E-06	4,23E-06	(Rahm & Enachescu, 2004)
HFM01	1,00E-03	5,25E-05	19,0	7,10E-05	6,31E-05	SICADA
HFM02	1,16E-03	1,88E-03	0,6	2,20E-03	5,91E-04	SICADA
HFM03	8,75E-04	7,74E-04	1,1	6,84E-04	4,20E-04	SICADA
HFM04	4,93E-04	9,13E-05	5,4	1,09E-04	7,87E-05	SICADA
HFM05	1,08E-03	2,32E-04	4,7	3,10E-04	3,96E-04	SICADA
HFM06	9,97E-04	2,50E-04	4,0	3,00E-04	3,32E-04	SICADA

HFM08	1,08E-03	7,50E-04	1,4	9,40E-04	1,29E-03	SICADA
HFM09	9,64E-04	3,52E-04	2,7	3,64E-04	3,72E-04	SICADA
HFM10	8,32E-04	2,79E-04	3,0	3,20E-04	3,11E-04	SICADA
HFM11	8,02E-04	5,98E-05	13,4	7,66E-06	4,31E-05	SICADA
HFM12	1,70E-04	1,20E-05	14,2	1,57E-05	1,43E-05	SICADA
HFM13	1,05E-03	3,50E-04	3,0	4,49E-04	3,12E-04	SICADA
HFM14	1,30E-03	6,26E-04	2,1	8,62E-04	5,66E-04	SICADA
HFM15	9,92E-04	9,82E-04	1,0	1,17E-03	3,19E-04	SICADA
HFM16	1,07E-03	1,19E-03	0,9	1,46E-03	5,26E-04	SICADA
HFM17	5,20E-04	5,77E-05	9,0	7,61E-05	3,93E-05	SICADA
HFM18	8,72E-04	1,26E-04	6,9	1,63E-04	*	SICADA
HFM19	9,08E-04	5,54E-04	1,6	7,17E-04	3,37E-04	SICADA
HFM20	1,10E-03	4,15E-04	2,7	4,15E-04	6,94E-05	SICADA
HFM21	1,03E-03	3,28E-04	3,1	3,38E-04	6,80E-04	SICADA
HFM22	1,00E-03	3,42E-04	2,9	3,40E-04	1,64E-04	SICADA
HFM23	1,65E-04	1,10E-05	15,0	1,40E-05	4,30E-06	SICADA
HFM24	1,08E-03	1,80E-04	6,0	2,50E-04	1,10E-04	SICADA
HFM25	9,33E-06	3,30E-07	28,3	4,30E-07	3,80E-07	SICADA
HFM26	1,49E-04	1,10E-05	13,6	1,40E-05	1,10E-05	SICADA
HFM27	8,30E-04	2,70E-04	3,1	3,30E-04	8,30E-05	SICADA
HFM28	8,30E-05	9,20E-06	9,0	1,20E-05	9,00E-06	SICADA
HFM29	8,33E-06	2,80E-07	29,8	3,60E-07	6,81E-08	SICADA
HFM30	9,13E-04	1,24E-04	7,4	1,58E-04	1,35E-04	SICADA
HFM32	1,08E-03	1,00E-03	1,1	1,30E-03	9,40E-04	SICADA
HFM33	8,08E-04	4,10E-04	2,0	5,10E-04	4,70E-04	SICADA
HFM34	1,16E-03	2,30E-03	0,5	3,00E-03	1,10E-03	SICADA
HFM35	6,66E-04	1,10E-04	6,1	1,40E-04	1,60E-04	SICADA
HFM36	6,61E-04	6,10E-05	10,8	7,87E-05	2,40E-05	SICADA
HFM37	8,27E-05	1,20E-05	6,9	1,50E-05	9,40E-06	SICADA
HFM38	9,89E-04	1,70E-04	5,8	2,30E-04	1,30E-04	SICADA
HFR101	1,67E-04	1,07E-05	15,6	1,38E-05	5,98E-06	SICADA
HFR105	2,47E-04	6,10E-05	4,0	5,06E-05	2,26E-05	SICADA
HFR106	8,30E-04	1,45E-04	5,7	1,89E-04	5,16E-05	SICADA

APPENDIX B – DATA FÖR ANALYS I SEDIMENTÄRT BERG

DATA FRÅN ENHÅLSPROVPUMPNINGAR OCH AQTESOLV

Tabell B.1 visar framtagen data från de 15 enhålsprovpumpningar som utfördes på Gotland. I Tabell B.2 visas resultat från bearbetning i AQTESOLV.

Tabell B.1 Data från utförda provpumpningar samt transmissivitet utvärderad från stationärt förlopp T_M (m^2/s). Q_p är det sista uppmätta pumpflödet vid test. Den specifika kapaciteten Q_p/dh_p (m^2/s) samt avsänkningen dh_p (m) visas. Värden markerade med * är uppskattade från återhämtningen. Värden markerade med ** är baserade på manuell lodning.

Borrhål	**Q_p (m^3/s)**	**dh_p (m)**	**Q_p/dh_p (m^2/s)**	**T_M (m^2/s)**
Martebo Utgård 1:50	5,46E-04	1,25	4,37E-04	5,20E-04
Gothem Kaupungs 1:19	5,40E-04	1,12	4,84E-04	5,53E-04
Dalhem Näsungs 1:12	5,50E-04	0,14	4,02E-03	5,03E-03
Fårö Lansa 7:1	9,40E-05	12,08	7,78E-06	2,66E-04
Fårö Hammars 1:35	5,20E-04	2,36	2,20E-04	3,57E-03
Norrlanda Annex 1:1:2	5,46E-04	0,17	3,13E-03	2,28E-05
Hejde Lojstahajd 1:1	5,30E-04	0,79	6,69E-04	7,88E-05
Lojsta Annex 1:1	3,52E-04	5,41	6,50E-05	6,95E-05
Stånga Stallause 1:16	5,10E-04	7,45	6,85E-05	2,78E-04
Burs Västerlaus 2:1	3,90E-04	1,63	2,40E-04	3,64E-06
Vamlingbo Austre 2:1	4,20E-05	12,30	3,42E-06	2,61E-06
Öja Stora Sutarve 1:2	4,00E-05	16,99	2,35E-06	-
Hejnum Nygårds 2:1	1,72E-07*	14,92*	1,16E-08*	3,12E-03
Visby Bjärs 1:3	5,10E-04	0,45	1,13E-03	1,01E-03
Fårö Hammars 1:10	5,10E-04	0,06**	8,50E-03**	9,62E-06

Tabell B.2 Resultat från provpumpningar i sedimentär berggrund på Gotland. Tabellen visar transmissivitet utvärderad från transienta förlopp T_T (m^2/s), magasinskoefficient S (-), skin-faktor S_w (-) samt uppskattad inre foderrörsradie r(c) (m). Samtliga värden är framtagna i AQTESOLV. Även resultat från utvärdering av stationärt förlopp i form av T_M (m^2/s) visas.

Borrhål	**T_T (m^2/s)**	**S (-)**	**S_w (-)**	**r(c) (m)**
Martebo Utgård 1:50	3,5E-04	1,4E-05	-3,10	0,09
Gothem Kaupungs 1:19	4,2E-04	1,4E-05	-4,90	0,09
Dalhem Näsungs 1:12	6,2E-03	5,5E-05	2,72	0,02
Fårö Hammars 1:35	8,5E-05	6,4E-06	-6,57	0,05
Norrlanda Annex 1:1:2	2,8E-03	1,2E-06	-5,16	0,09
Hejde Lojstahajd 1:1	6,8E-04	1,8E-05	-4,59	0,08
Lojsta Annex 1:1	6,6E-05	5,7E-06	-2,82	0,06
Stånga Stallause 1:16	3,0E-05	3,8E-06	-5,81	0,06
Vamlingbo Austre 2:1	9,2E-07	6,7E-07	-6,14	0,07
Burs Västerlaus 2:1	4,0E-04	1,4E-05	0,88	0,07
Öja Stora Sutarve 1:2	-	-	-	-
Hejnum Nygårds 2:1	-	-	-	-
Visby Bjärs 1:3	-	-	-	-
Fårö Hammars 1:10	-	-	-	-
Fårö Lansa 7:1	-	-	-	-

APPENDIX C – PROVPUMPNINGAR PÅ GOTLAND

UTRUSTNING

- Tryckgivare med logger för mätning av vatten- och lufttryck från Solinst®

För att mäta avsänkningen i borrhålet användes tryckgivaren Levelogger Edge (modell 3001, LT F100/M30) från Solinst® som mäter totaltryck (dvs. vatten- och lufttryck) och temperatur. Tryckgivaren var monterad en dryg halvmeter ovanför pumpen och var fäst vid pumpslang och en vajer. Med hjälp av ett brythjul underlättades nedsänkning av utrustning i borrhål och gav stabilitet vid pumpning. Maximalt kunde tryckgivaren mäta på 30 meters djup under grundvattenytan med en mätnoggrannhet på ±0.05 % i full skala. Lufttrycket och lufttemperaturen mättes med Barologger Edge (modell 3001) från Solinst®. Barometern användes för att mäta atmosfärstrycket uppe vid markytan. Modellen har en mätnoggrannhet på ±0.05 kPa (Solinst®, 2017).

- Pump med frekvensomvandlare

Den dränkbara pump som användes för att pumpa upp vatten ur borrhålet var MP1 från Grundfos. Pumpen hade ingen backventil vilket gjorde att flödet kunde rinna ur pumpen vid pumpstopp. Maximal uppfordringshöjd var 30 m och flödet kunde varieras mellan 0-2 m^3/tim (Eijkelkamp, 2017). Pumpen styrdes med hjälp av en frekvensomvandlare av typen IP66 (NEMA 4X) från Optidrive™. Maximal frekvens var 400 Hz (Eijkelkamp, u.å.).

- Bobin med pumpslang, pumpkabel, tryckgivarkabel och vajer. Med anslutning för vidare borttransport av vatten till flödesmätare.

- Flödesmätare

Elektromagnetisk flödesmätare MV110 med tillhörande flödesförstärkare MS501 som möjliggör direkt avläsning av mätvärden på display. Fel vid mätning uppgår maximalt till 0,4 % enligt tillverkare ned till en hastighet av 0,5 m/s. Båda produkterna kommer från ISOIL INDUSTRIA (ISOIL Industria, u.å., a; ISOIL Industria, u.å, b). Flödesmätaren kopplades till bobinen som hade en anslutning för flödet på sidan samt till en avbördningsslang på 30 m för bortledning av vatten.

- Kabelljuslod

Användes för manuell lodning av grundvattennivån. Referenspunkten för mätningarna var foderrörets överkant.

- Elaggregatet som användes var från HONDA av modell EU20i.

- Avbördningsslang som hade längden 30 m för bortledning av vatten. Med hjälp av att vattnet samlades upp i en blå hink kunde flödet hållas jämnare vid avledningen.

UTVÄRDERING AV PROVPUMPNINGAR PÅ GOTLAND

I Tabell C.1 visas när pumptesterna genomfördes i vilket borrhål. Pumptester genomfördes inte i Gothem Suderbys 1:27, Burs Änges 1:45, Vamlingbo Storms 4:1 samt Burs Ammunde 1:16. Gothem Suderbys 1:27 var för artesiskt. Burs Änges 1:45 och Burs Ammunde 1:16 var otillgängliga på grund av översvämmade, leriga och dåliga vägar. I Vamlingbo Storms 4:1 fanns ljus olja i borrhålet som gjorde provpumpningen olämplig. Tabellen visar även borrhålens koordinater i referenssystemet SWEREF 99 TM från brunnsprotokoll i SGU:s brunnsarkiv samt Alm (2014) och (2017).

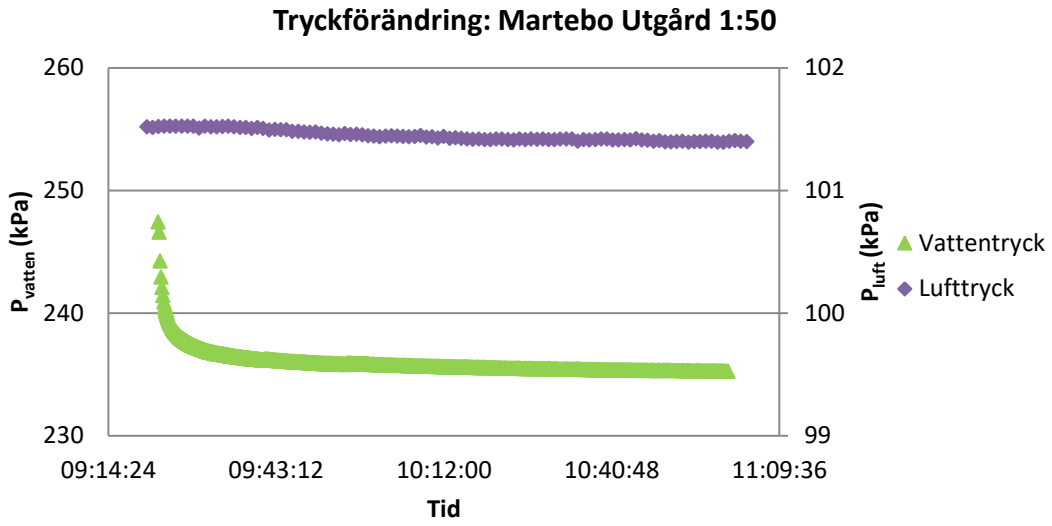
Tabell C.1 Beskriver när pumptesterna gjordes i de olika borrhålen samt borrhålens koordinater i referenssystemet SWEREF 99 TM.

Mätning	Datum	Borrhål	N	E
1	14-mar 2017	Martebo Utgård 1:50	6406125	705753
2		Hejnum Nygårds 2:1	6401729	714709
3		Visby Bjärs 1:3	6391035	708838
4	15-mar 2017	Gothem Kaupungs 1:19	6392113	722755
5		Dalhem Näsungs 1:12	6387083	711445
6	16-mar 2017	Fårö Lansa 7:1	6425313	740785
7		Fårö Hammars 1:35	6423489	745445
8	18-mar 2017	Fårö Hammars 1:10	6432005	754322
9	20-mar 2017	Norrlanda Annex 1:1:2	6378615	719131
10	21-mar 2017	Hejde Lojstahajd 1:1	6363146	707100
11		Lojsta Annex 1:1	6359619	700506
12	22-mar 2017	Stånga Stallause 1:16	6352662	708251
13	23-mar 2017	Burs Västerlaus 2:1	6350440	708569
14	24-mar 2017	Vamlingbo Austre 2:1	6315587	698615
15	25-mar 2017	Öja Stora Sutarve 1:2	6322222	700249
-		Gothem Suderbys 1:27	6384146	720744
-		Burs Änges 1:45	6351300	712525
-		Vamlingbo Storms 4:1	6315587	697964
-		Burs Ammunde 1:16	6347983	712754

Av de pumptest som utfördes kunde 10 utvärderas från transienta förlopp enligt *Metod*. För vissa av pumptesten har utvärderingarna skilt sig lite från metoden vilket redovisas nedan. De fem provpumpningar vars transienta förlopp inte kunde utvärderas var Hejnum Nygårds 2:1, Visby Bjärs 1:3, Fårö Lansa 7:1, Fårö Hammars 1:10 samt Öja Stora Sutarve 1:2.

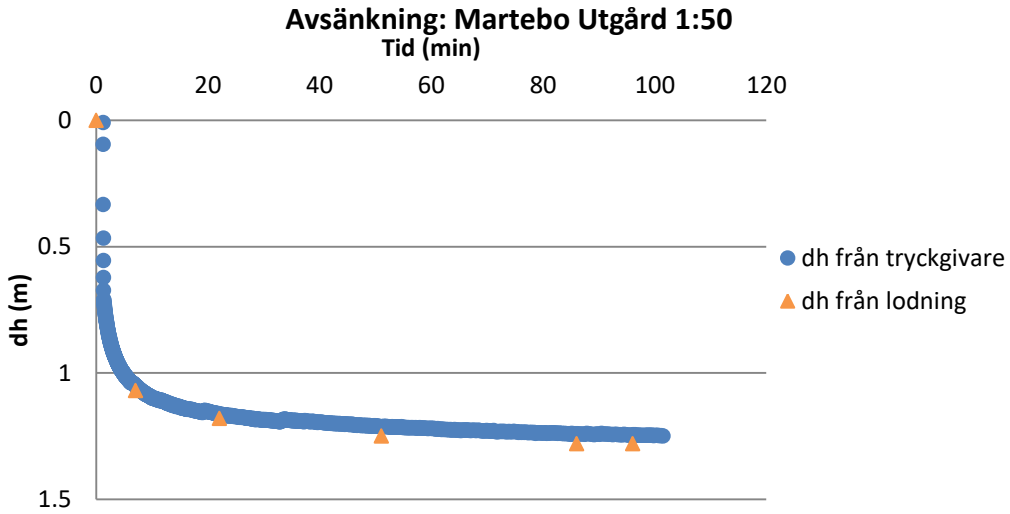
Martebo Utgård 1:50

Artesiskt borrhål med ett svagt flöde (<1 liter/min) från skarv mellan foderrör och fläns. Pumpstarten gjordes för tidigt vilket gav få mätpunkter de första sekunderna. Flödet som avlästes från flödesmätaren fladdrade en del under mätningen men stabiliserade sig efter hand. Vid ett tillfälle testades flödet med hjälp av en hink och klocka med resultatet 0,60 liter/s vilket stämde relativt bra överens med avlästa värden på mellan 0,54–0,55 liter/s. I Figur C.1 visas luft- och vattentryck under pumptestet. Lufttrycket mättes direkt vid markytan medan vattentrycket justerades för den marginella skillnaden i lufttryck som ses i figuren.



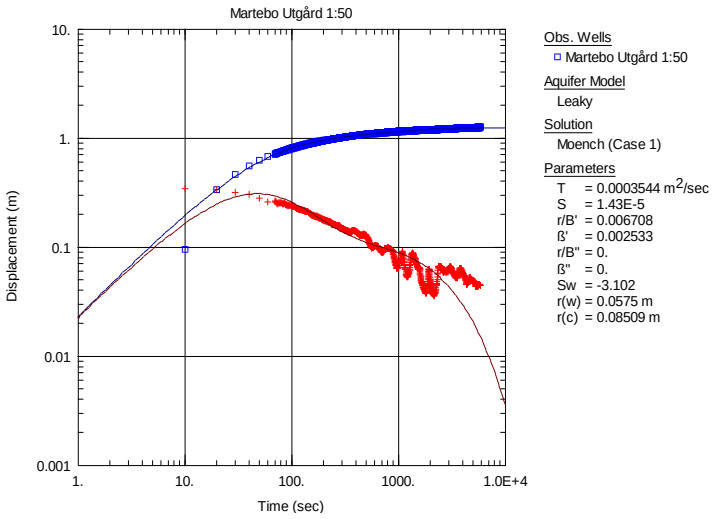
Figur C.1 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Martebo Utgård 1:50. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.

Figur C.2 visar den totala avsänkningen under pumptestet på ca 1,25 m. Tryckgivarens uppmätta värden bekräftas av de lodade värdena som också visas.



Figur C.2 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Martebo Utgård 1:50. Både värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

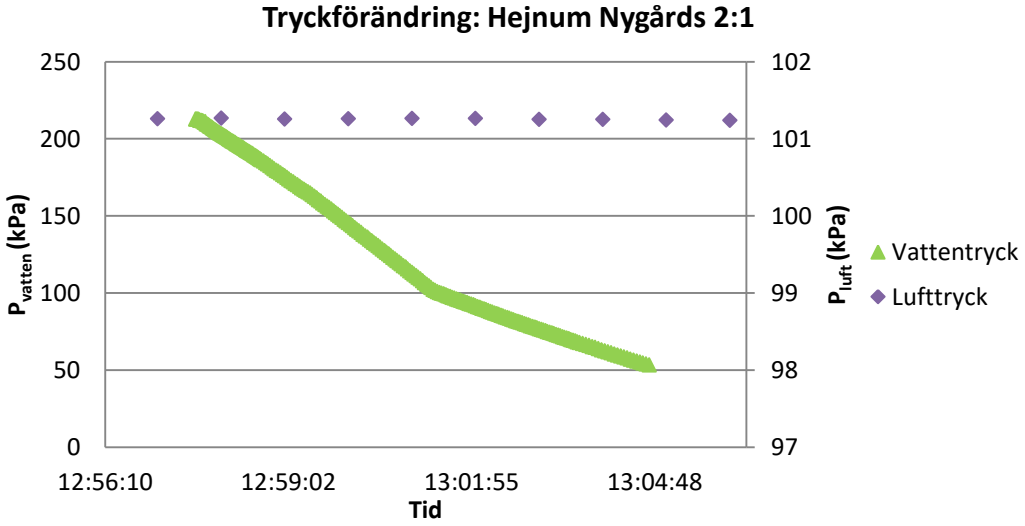
För utvärderingen i AQTESOLV har flödet satts till 0,54 liter/s under hela testet. Detta för att få en jämn derivata som underlättar utvärderingen av det transienta förloppet. I Figur C.3 visas avsänkningen över tid. Eftersom att pumpstarten skedde något tidigt finns endast ett fåtal punkter initialt. I början är avsänkningen sannolikt styrd av brunnsmagasins-effekter innan en möjlig sfärisk (PRF) eller radiell (PRF) flödesregim dominerar. Derivatan har en lutning på approximativt -0.5 efter ca 100 s och framåt. I den kvalitativa utvärderingen styrks en intermediär flödesregim av PRF och PLF av modelltest med Barker, (1988). Ett värde på n fås på 2,7 som är på gränsen till en pseudo-sfärisk flödesregim. Därför har Moench (1985) valts som modell för den kvantitativa utvärderingen. I figuren visas även modellanpassningen med Moench (1985) i AQTESOLV. Anpassningen stämmer överens med uppmätt data trots viss brusighet i testets slutskede. Den kvantitativa utvärderingen ger ett T_T på $3{,}5 \cdot 10^{-4}$ m^2/s. Motsvarande värde från utvärderat stationärt förlopp T_M bestämt med Moyes ekvation (1967) är av samma storleksordning på $5{,}2 \cdot 10^{-4}$ m^2/s.



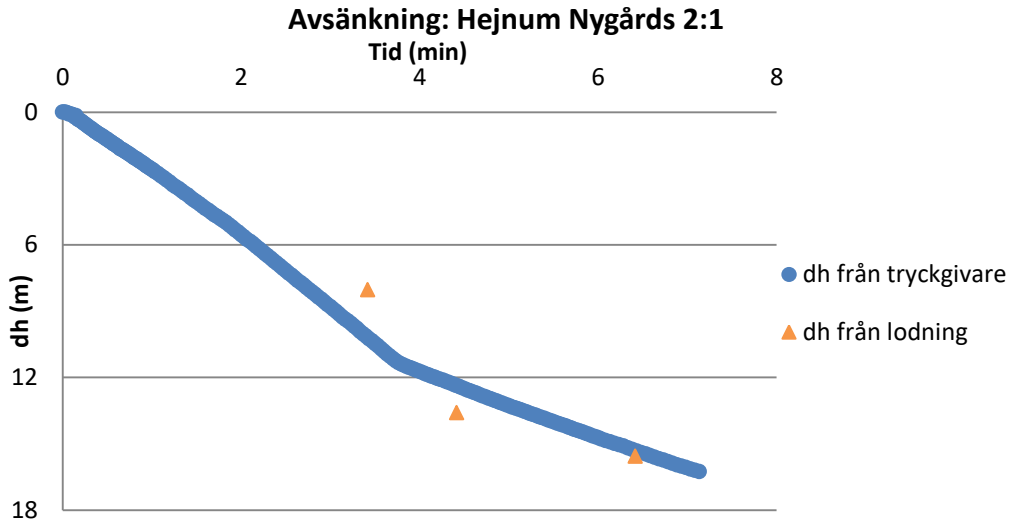
Figur C.3 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Martebo Utgård 1:50 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning med Moench (1985) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

Hejnum Nygårds 2:1

När utrustningen sänktes ned i borrhålet ökade grundvattenytans läge med ca 0,3 m. Vid pumpstart var avsänkningen kraftig varpå frekvensen sänktes kl. 13:01 från 400 Hz till 228,9 Hz. Det initiala flödet antecknades inte utan antogs till 0,54 liter/s, men efter ändringen var flödet 0,24 liter/s. På grund av att avsänkningen var stor (Figur C.4 och Figur C.5) var troligtvis inte frekvensen tillräcklig hög vilket resulterade i att pumpningen avbröts kl. 13:04. Efter pumpstopp mättes istället återhämtningen hos grundvatten-trycket fram till kl. 13:42.

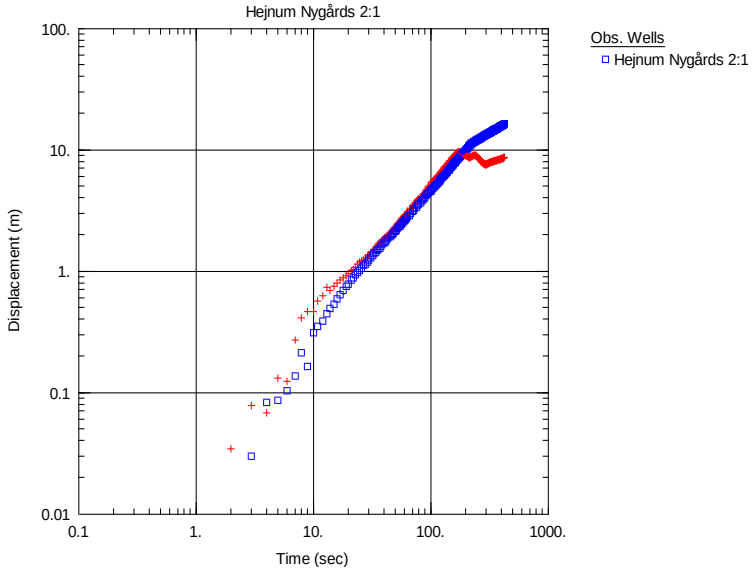


Figur C.4 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Hejnum Nygårds 2:1. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.5 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Hejnum Nygårds 2:1. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

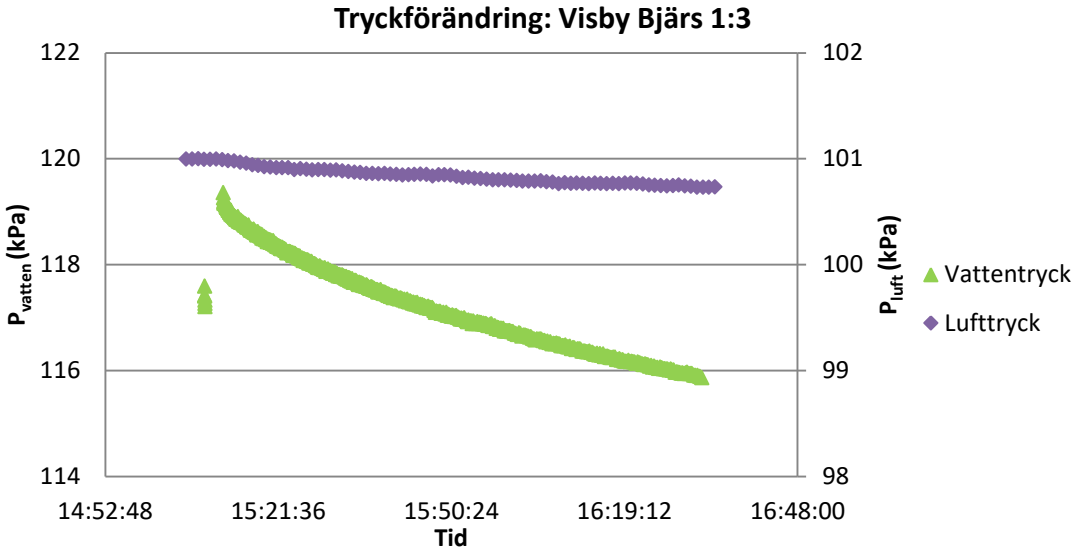
Fram till dess att återhämtningen mättes ses avsänkningens förlopp över tid i logskala i Figur C.6. Den korta pumptiden gjorde att ingen analys kunde utföras av det transienta förloppet i AQTESOLV. Eftersom återhämtningen mättes kunde däremot en skattning av den specifika kapaciteten och flödet göras genom att beräkna den volym som motsvarar skillnaden i tryck under återhämtningsperioden. Tiden för den data som användes var totalt 31 min, där data togs bort direkt efter pumpstopp på grund av det vatten som rann tillbaka ner i hålet i brist på en backventil hos pumpen. Genom att dividera volymen med tiden beräknades flödet $1{,}72 \cdot 10^{-7}$ m^3/s. Med medelavsänkningen under återhämtningen på 14,9 m skattades Q/dh till $1{,}16 \cdot 10^{-8}$ m^2/s.



Figur C.6 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala Hejnum Nygårds 2:1 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2.

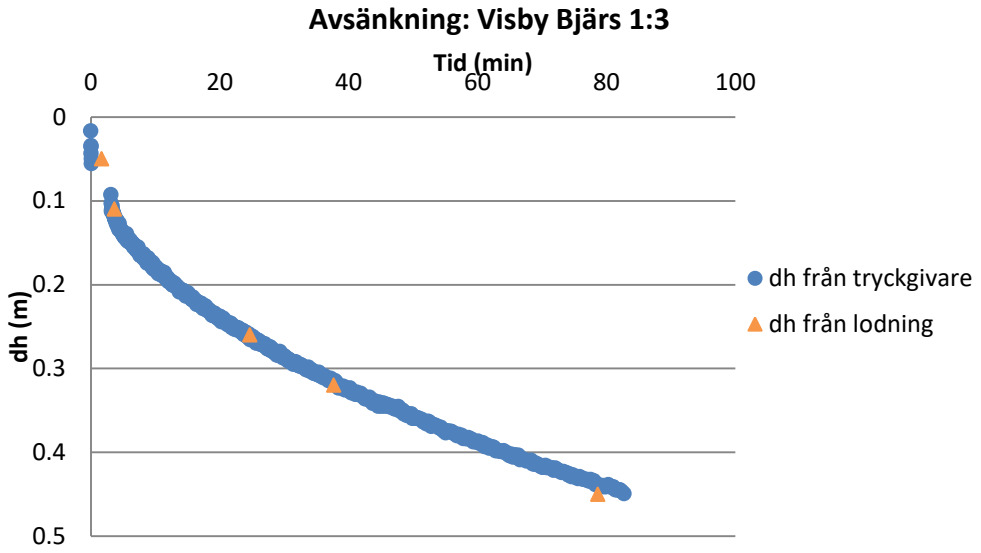
Visby Bjärs 1:3

Det hördes ett tydligt porlande vilket tydde på vattengivande sprickor ovanför den initiala grundvattennivån på 13,57 m u rö. Vid pumpstart sträcktes slangen ut vilket sågs tydligt i mätdata, se Figur C.7 över uppmätta luft- och vattentryck. Eftersom att angiven kapacitet för borrhålet var låg startades mätningen med en frekvens på 69,7 Hz. Frekvensen var inte tillräcklig för att ge något flöde på grund av den stora lyfthöjden. Frekvensen ökades därför till 216,9 Hz och sedan till 400 Hz med motsvarande flöden på 0,22 liter/s och 0,51 liter/s. Konduktiviteten uppmättes kl. 15:16 och 15:34 till 650 respektive 623 µS/cm.

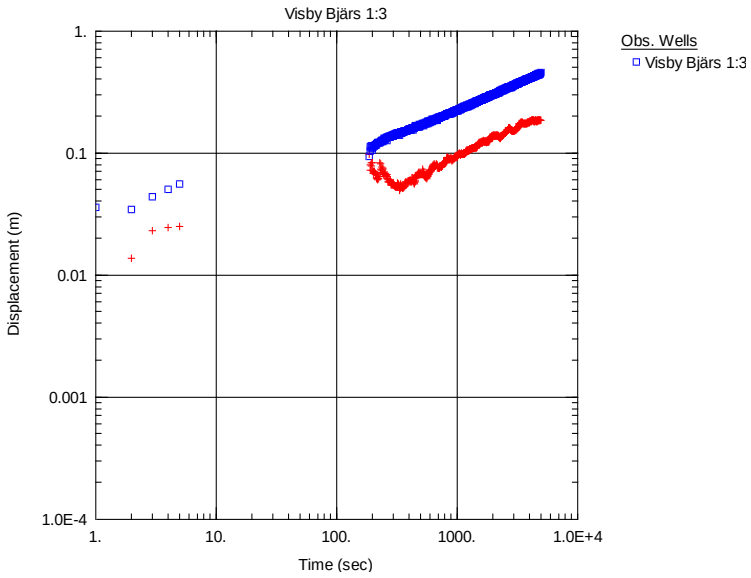


Figur C.7 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Visby Bjärs 1:3. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.

På grund av den slangsträckning som skedde initialt har avsänkningen justerats med motsvarande 0,26 m efter tiden 188 s samt att data under själva sträckningen tagits bort, se Figur C.8. I figuren ses att de lodade värden stämmer överens med de uppmätta och justerade värdena. Dessa justerade värden användes i AQTESOLV, se Figur C.9, där tidsglappet ser ut att vara större på grund av logskalan. Efter ca 300 s ökar både avsänkningskurvan och dess derivata med en lutning på ungefär 0,5. Det gör det mest troligt att en pseudo-linjär flödesregim dominerar flödesbilden i berget. Med en PLF kunde ingen entydig modellpassning göras varför endast ett värde på transmissiviteten för stationära förhållanden beräknades till $3{,}1 \cdot 10^{-3}$ m^2/s.



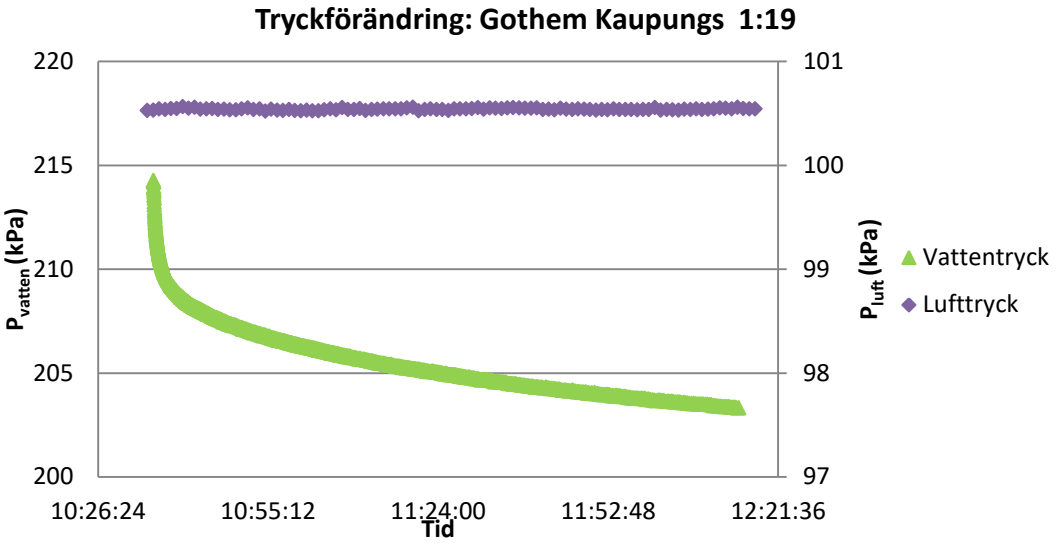
Figur C.8 Avsänkningens (dh) förlopp över tid i enheterna meter respektive minuter för Visby Bjärs 1:3. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas. Avsänkningen har justerats för slangsträckning med 0,26 m efter 188 s.



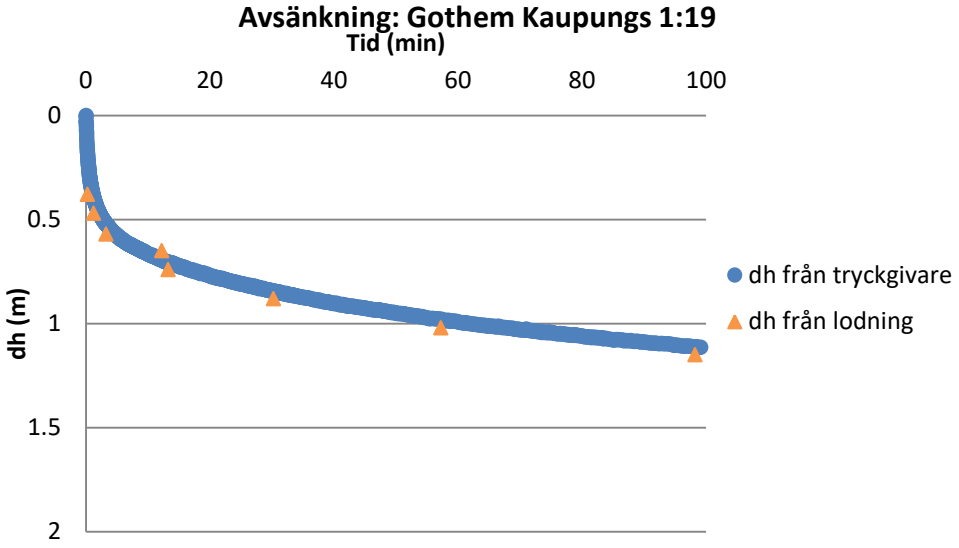
Figur C.9 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala Visby Bjärs 1:3 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2.

Gothem Kaupungs 1:19

Mätningen genomfördes med högsta frekvens 400 Hz och konstant flöde 0,54 liter/s. Konduktiviteten uppmättes kl. 10:57 och kl. 11:33 till 1240 respektive 1242 µS/cm. Under pumptestet var lufttrycket konstant medan vattentrycket minskade från ca 214 till 203 kPa, se Figur C.10. Pumptestets totala avsänkning var ca 1,2 m vilket visas i Figur C.11. De uppmätta värdena från tryckgivare och kabelljuslodning överensstämmer.



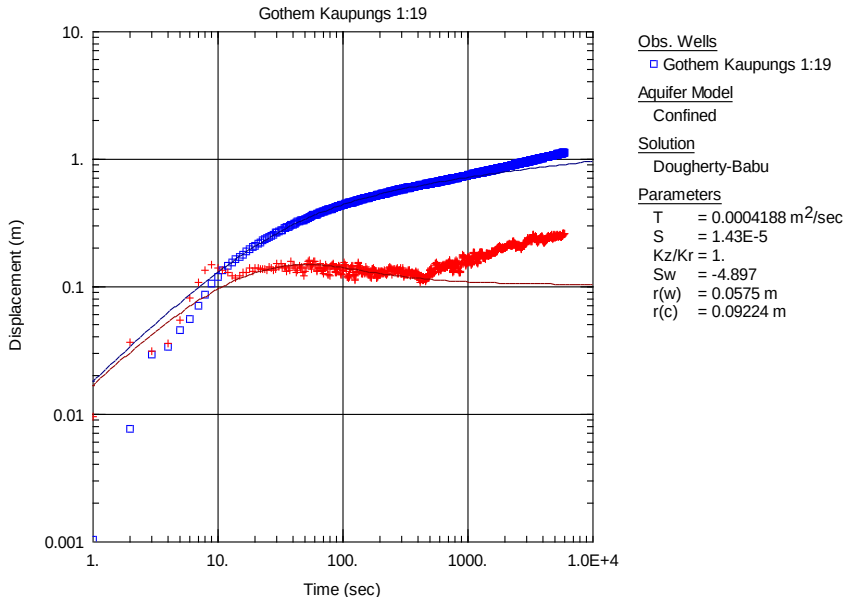
Figur C.10 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Gothem Kaupungs 1:19. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.11 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Gothem Kaupungs 1:19. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.12 ses avsänkningen och dess tidsderivata för Gothem Kaupungs 1:19 i AQTESOLV. Efter ca 10 s där pumpning av brunnsmagasinet tydligt ses är det sannolikt en pseudo-radiell fas (PRF) fram till ca 400 s. Därefter ökar både avsänkningen och dess derivata under resten av testet. En tolkning av ökningen kan vara att derivatan börjar plana ut i en ny PRF som kan anas i testets slutskede. En annan tolkning är att den dominerande flödesregimen är pseudo-linjär (PLF). I utvärderingen är det den radiella fasen som analyseras vilket gör modellen av Dougherty & Babu (1984) lämplig. I figuren ses även modellanpassningen för Gothem Kaupungs 1:19 i

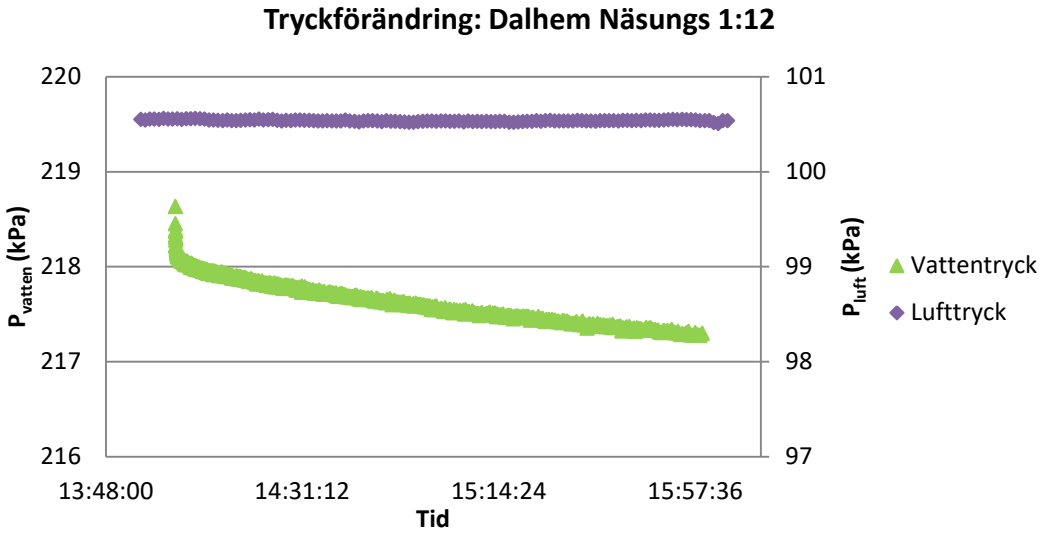
AQTESOLV. Anpassningen till den PRF är god fram till flödesregimen ändras vid tiden 400 s. Transmissiviteten för berget uppskattas genom modellen till $4{,}2 \cdot 10^{-4}$ m^2/s. Värdet utvärderat med Moyes ekvation T_M är $5{,}5 \cdot 10^{-4}$ m^2/s.



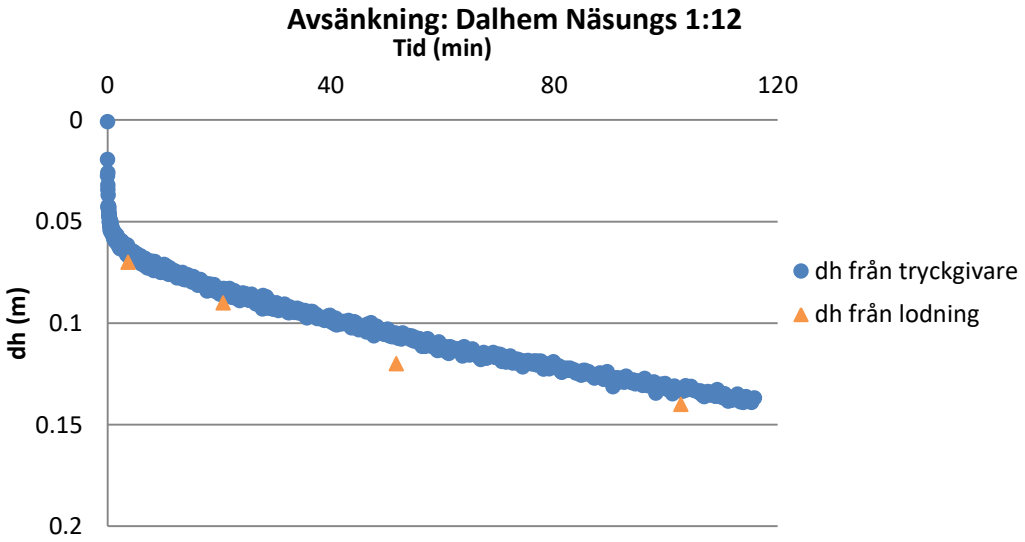
Figur C.12 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Gothem Kaupungs 1:19 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

Dalhem Näsungs 1:12

Dalhem Näsungs 1:12 var ett borrhål med artesiskt grundvatten som det rann relativt mycket vatten ur. Rostutfällningar syntes när locket skruvades av. Inledningsvis gjordes ett försök att få ned grundvattenytan till precis under foderrörskanten med frekvenserna 103,7, 110 och 150 Hz. Dock rann det ut några droppar mellan flens och foderrör. Ett försök att uppskatta flödet gjordes med hink och klocka gjordes innan pumpstart med resultatet 0,22 liter/s då vattenytan var stabil precis under foderrörskant. Detta flöde bör därmed motsvara det artesiska flödet. Under testet var det utgående flödet konstant på 0,55 liter/s. Konduktiviteten mättes vid två tillfällen kl. 14:20 och 14:55 till 790 och 794 µS/cm. Lufttrycket var konstant under mätning vilket visas i Figur C.13. En liten minskning i vattentrycket uppstod vid pumpning. Figur C.14 visar avsänkningen under pumptest i Dalhem Näsungs 1:12. Grundvattennivån sänktes nästan 0,15 m vilket både uppmätta värden från tryckgivare samt lodade värden visar.



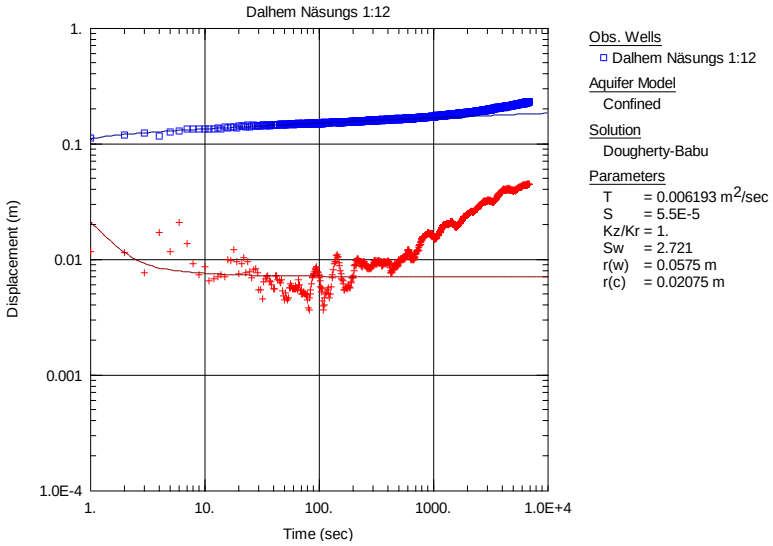
Figur C.13 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Dalhem Näsungs 1:12. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.14 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Dalhem Näsungs 1:12. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.15 ses avsänkningen och dess derivata för pumptest i Dalhem Näsungs 1:12 i AQTESOLV. Eftersom att borrhålet var artesiskt har avsänkningen justerats med 0,09 m, vilket är baserat på det artesiska flödet som uppskattades innan pumptestet. Justeringen gav dock ingen signifikant skillnad för slutresultatet. Ingen tydlig brunnsmagasinseffekt ses initialt, men en möjlig PRF ses fram till ca 400 s. Den radiella fasen är svår att fastställa på grund av den relativt brusiga derivatan under denna tidsperiod, men bedöms som rimlig då ingen annan flödesregim kan uttolkas.

Den kvantitativa utvärderingen visas även i Figur C.15 med uppskattat T_T på $6{,}2 \cdot 10^{-3}$ m^2/s. Modellanpassningen med Dougherty & Babu (1984) ger en relativt god passning till data under den pseudo-radiella delen av testet. Motsvarande värde T_M från antagna stationära förhållanden är $5{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^2/s.

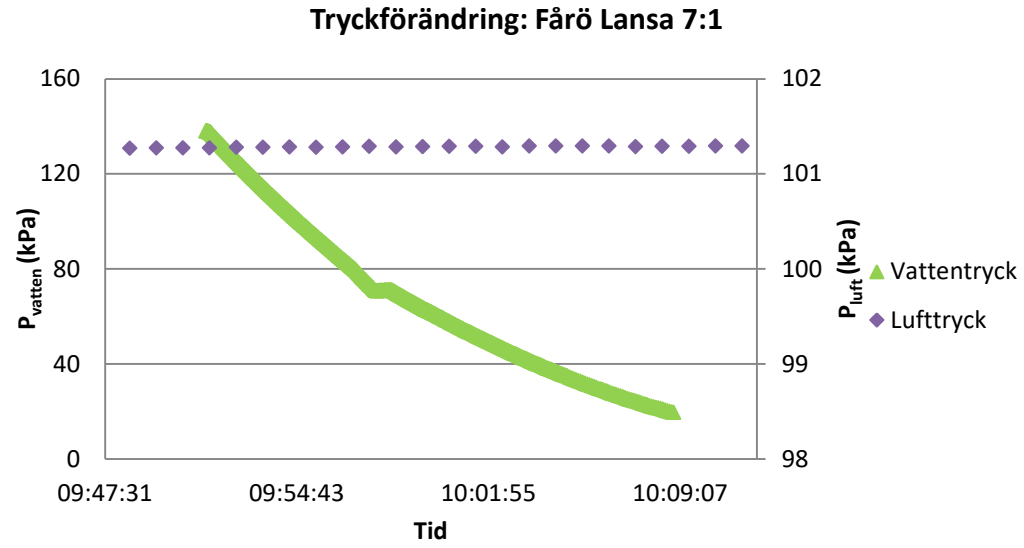


Figur C.15 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Dalhem Näsungs 1:12 i AQTESOLV. Avsänkningen har justerats med 0,09 m motsvarande det artesiska flödet. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,4. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

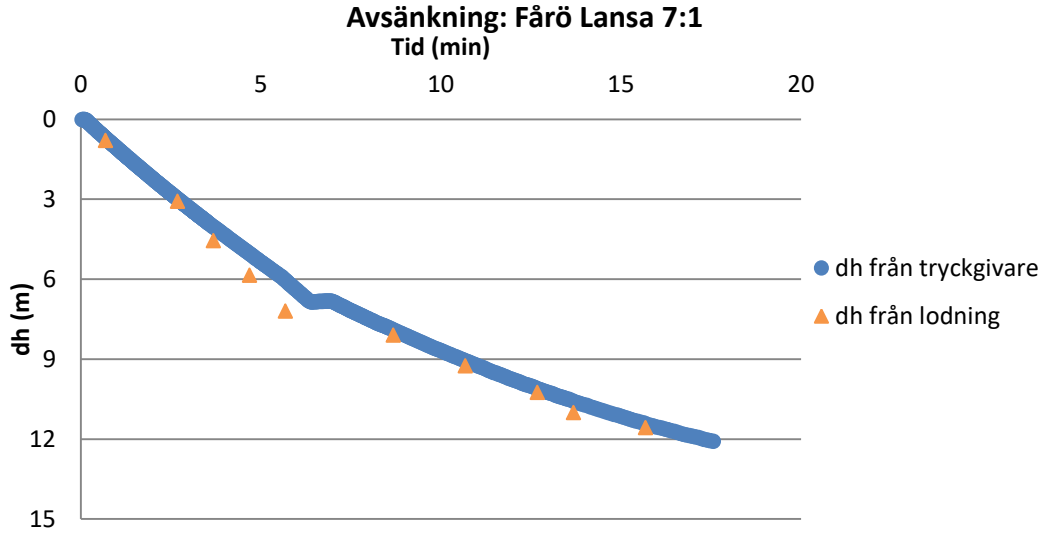
Fårö Lansa 7:1

Borrhålets grundvatten var artesiskt, med vatten som rann sakta längs med foderrörets utsida. Någon droppe föll från flänsen ca 2 ggr/s. På grund av att borrhålets artesiska flöde var litet bortsågs det ifrån i analysen av provpumpningens transienta förlopp. Vattnet innehöll rostutfällningar som syntes när locket skruvades av. Det var rätt svårt att sänka ned utrustningen i borrhålet, så mätningen genomfördes med ungefär 14-15 m slang nedsänkt. Frekvensen sänktes från 200 Hz till 100 Hz vid tiden 09:57, men höjdes strax därpå till 149,5 Hz eftersom flödet blev för lågt, se Figur C.16. Motsvarande flöden var 0,25 liter/s och sedan 0,14 liter/s. Frekvensen sänktes ytterligare till 100 Hz kl. 10:08 för att inte pumpa torrt, men då avstannade flödet. Därför skedde analysen endast fram till denna tid. Lufttrycket var konstant under mätningen.

När grundvattenytan var på ca 8 m djup hördes ett tydligt porlande. Nedfallande vatten gjorde det svårt att loda. De lodade värdena och de uppmätta värdena från tryckgivaren i borrhålet sammanfaller ändå vilket ses i Figur C.17. Avsänkning blev strax över 12 m vid testets slut.

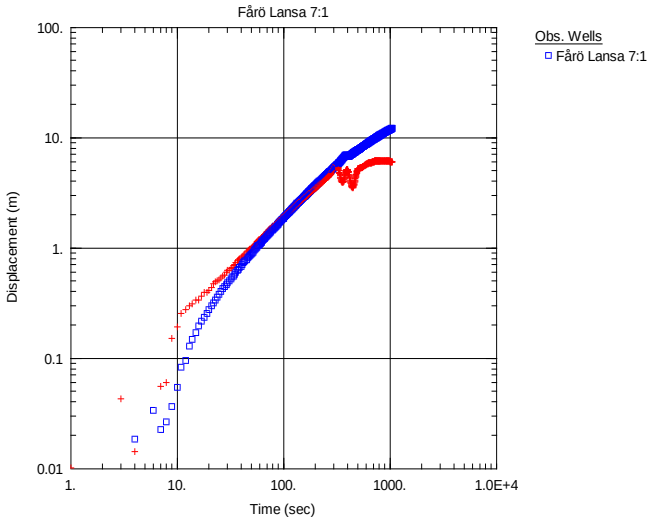


Figur C.16 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Fårö Lansa 7:1. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.17 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Fårö Lansa 7:1. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

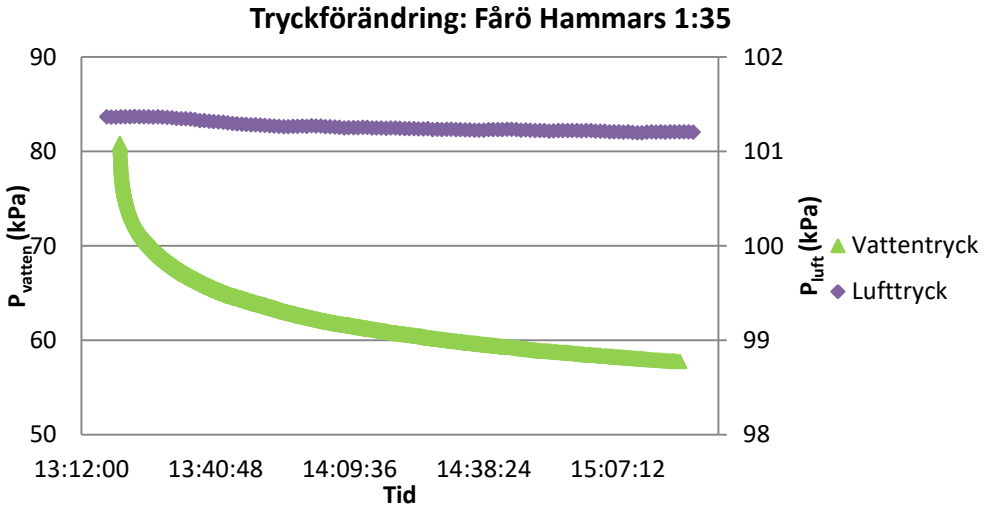
I Figur C.18 visas avsänkningen och dess tidsderivata för provpumpning i Fårö Lansa 7:1. Eftersom att testet var relativt kort och flödet ändrades flertalet gånger var det svårt att fastslå flödesregim efter de brunnsmagasinseffekter som ses fram till ca 200-300 s. Eftersom att derivatan planar ut kan det tyda på en PRF, varför modellen av Dougherty & Babu (1984) valdes för den kvantitativa utvärderingen. Dock kunde ingen entydig lösning erhållas med modellen och genom det ingen skattning av transmissiviteten. Ett värde T_M för stationära förhållanden beräknades på $9{,}6 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.



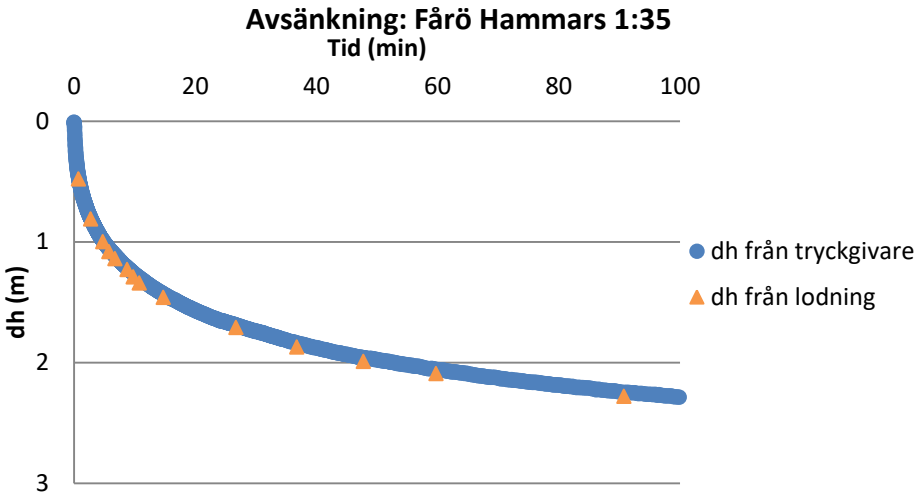
Figur C.18 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala Fårö Lansa 7:1 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2.

Fårö Hammars 1:35

För Fårö Hammars 1:35 var det svårt att få ned utrustningen i borrhålet, endast ca 9 m av utrustningen sänktes ner. Flödet var mestadels stabilt på 0,52–0,53 liter/s enligt flödesmätaren, men fladdrade något stundtals. Konduktiviteten uppmättes till 528 µS/cm kl. 15:15. Hur luft- och vattentryck ändrades under mätningen visas i Figur C.19 och provpumpningens avsänkning i Figur C.20. Den totala avsänkningen var nästan 2,4 m, med tryckgivarens uppmätta värden som styrks av lodade.

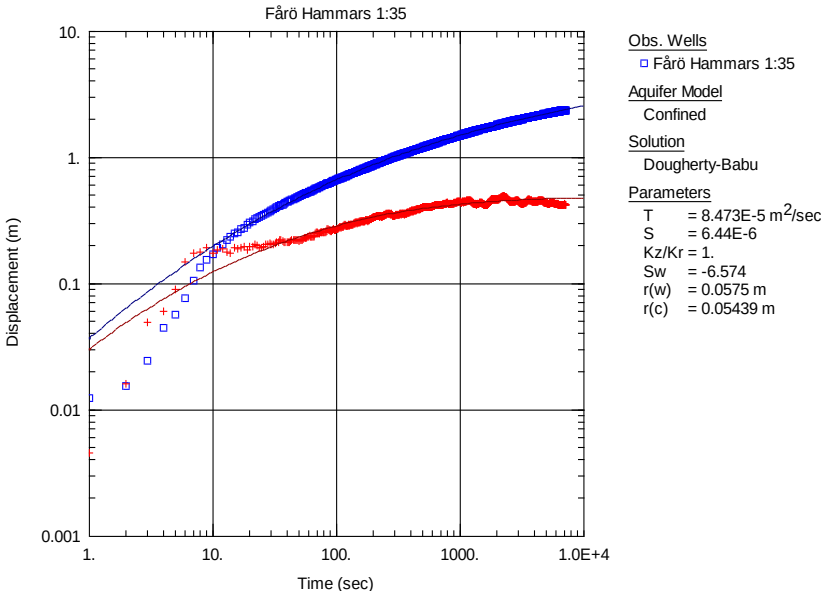


Figur C.19 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Fårö Hammars 1:35. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.20 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Fårö Hammars 1:35. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

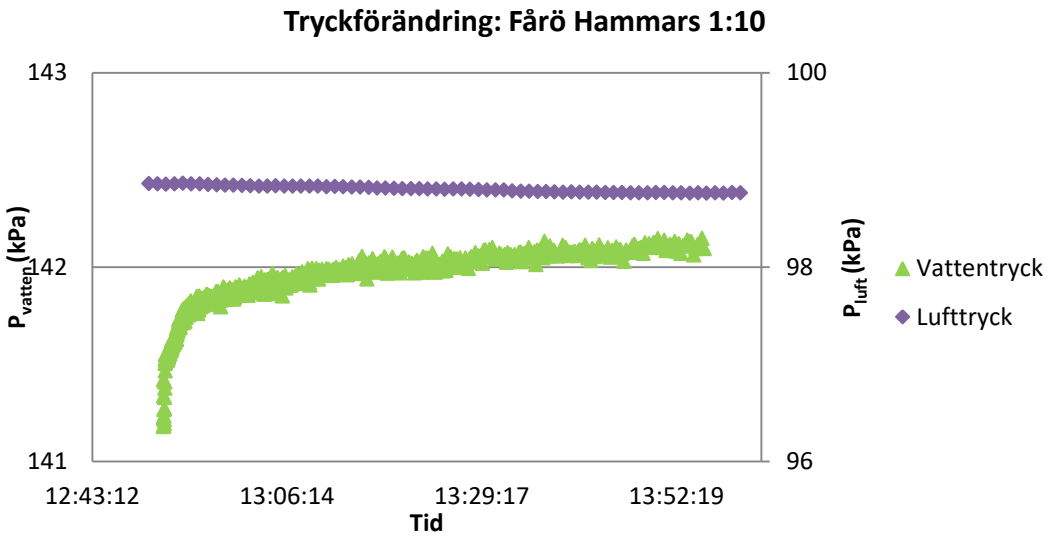
Figur C.21 visar avsänkningen för Fårö Hammars 1:35 i AQTESOLV. Efter ca 600 s planar derivatan ut vilket kan tolkas som en PRF efter inledande brunnsmagasinseffekt. För den kvantitativa utvärderingen har därför modellen av Dougherty & Babu (1984) valts. I figuren visas anpassning med Dougherty och Babus modell (1984). Passningen är relativt god och ger ett T_T på $8{,}5 \cdot 10^{-5}$ m^2/s. Värdet kan jämföras med T_M på $2{,}7 \cdot 10^{-4}$ m^2/s för stationära förhållanden som är större.



Figur C.21 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Fårö Hammars 1:35 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

Fårö Hammars 1:10

Under mätningen förekom ingen avsänkning förutom en initial sänkning av grundvattennivån på 0,06 m. Flödet var konstant på 0,51 liter/s. Det var svårt att avleda vattnet i en bra riktning då det sluttade relativt lite kring borrhålet. I Figur C.22 ses hur vattentrycket och lufttrycket förhåller sig till varandra under pumptestet. Lufttrycket minskar marginellt, vilket kunde ha haft en viss inverkan i detta fall då avsänkningen är mycket liten. Vattentrycket i borrhålet ökar något vilket troligen beror på en initial slangsträckning.

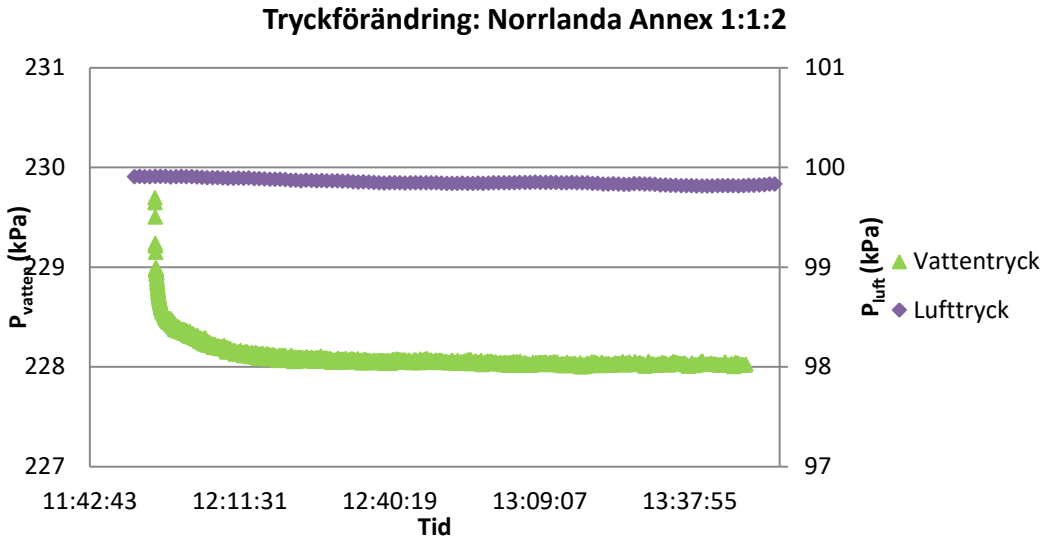


Figur C.22 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Fårö Hammars 1:10. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.

På grund av att ingen avsänkning sker under pumptestet ingen analys av det transienta förloppet utföras. För att uppskatta transmissiviteten har endast ett värde för stationära förhållanden beräknats med Moyes ekvation. I ekvationen har den lodade trycksänkningen på 0,06 m använts. Transmissiviteten T_M för Fårö Hammars 1:10 uppskattas på så sätt till $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^2/s.

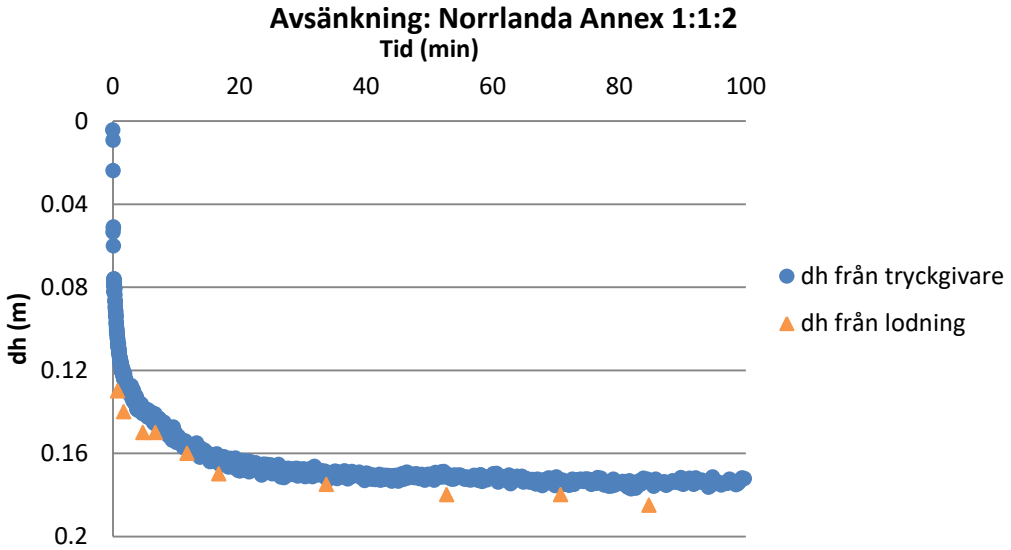
Norrlanda Annex 1:1:2

Under mätningen var vattnet till en början orange-brunt, men blev klart efter ca 10 min. Vattenflödet hade en liten variation inledningsvis men blev stabilt efter ca 20 min. Flödet var mellan 0,54–0,55 liter/s under testet, men approximerades till 0,54 liter/s i utvärderingen av det transienta förloppet. I Figur C.23 visas hur luft- och vattentryck ändrades under testet. Lufttrycket var relativt konstant medan vattentrycket ändrades från nära 230 till ca 228 kPa.



Figur C.23 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Norrlanda Annex 1:1:2. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.

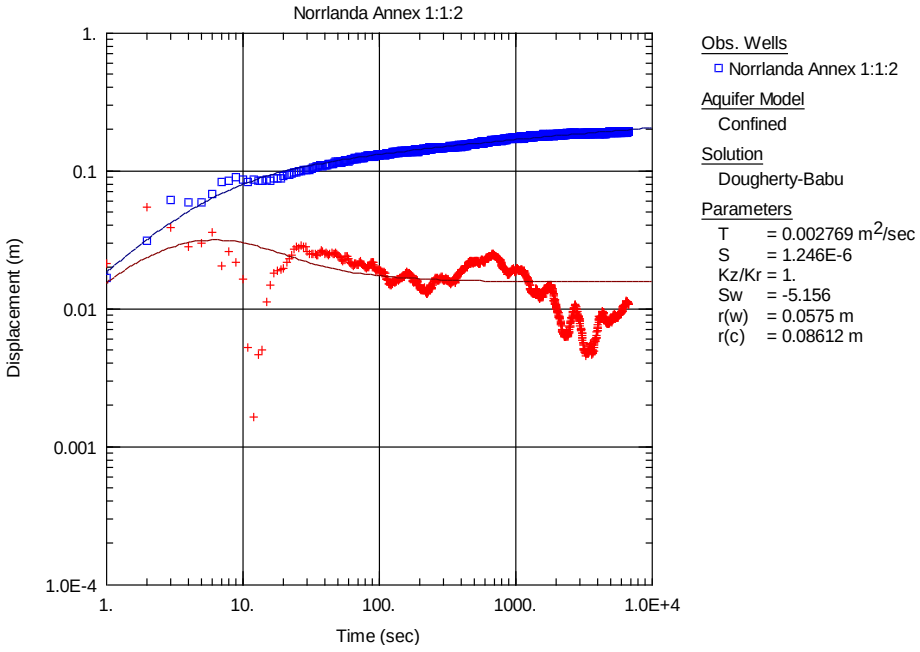
Motsvarande avsänkning för Norrlanda Annex 1:1:2 ses i Figur C.24, som totalt var ca 0,17 m. I figuren visas både tryckgivarens uppmätta värden som justerats med interpolerat uppmätt lufttryck samt uppmätta värden från lodning. Med hänsyn till den lilla avsänkning som gjordes styrker de lodade värdena avsänkningen relativt bra.



Figur C.24 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Norrlanda Annex 1:1:2. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.25 visas avsänkningens förlopp över tid samt dess tidsderivata i AQTESOLV. Initialt styr brunnsmagasinseffekter innan avsänkningen planar ut. Derivatan har två dalar vid ca 10 och 3500 s men är i övrigt inte nämnvärt brusig. Möjlig styrande

flödesregim skulle kunna vara pseudo-radiell (PRF) eller pseudo-sfärisk (PSF) under testet. Mellan ca 100 och 350 s finns en tydlig utplaning av derivata som kan tolkas som en PRF. När derivatan därefter sänks av från ca 500 s skulle detta kunna vara en PSF. Ett annat alternativt skulle vara att en ny PRF inleds. Sammantaget har Dougherty & Babu (1984) valts för modellanpassning av den, vilket styrks av försök med Barker (1988) som ger ett n på 2,38 vilket gränsar till radiellt flöde. Figuren visar modellanpassningen i AQTESOLV. Anpassningen med Dougherty & Babu (1984) stämmer relativt bra överens med data. Transmissiviteten T_T uppskattas genom modellen till $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ m^2/s vilket kan jämföras med T_M på $3{,}6 \cdot 10^{-3}$ m^2/s.

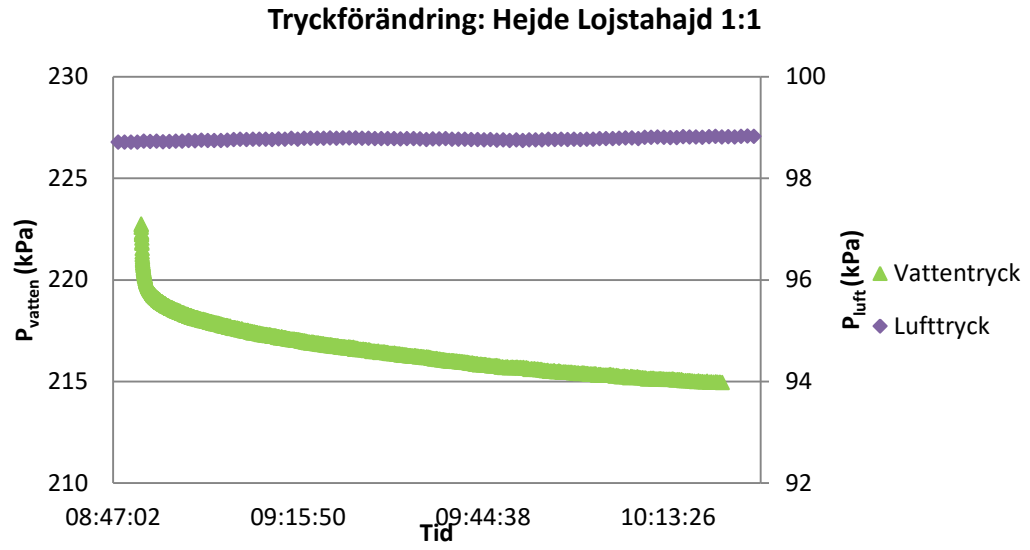


Figur C.25 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Norrlanda Annex 1:1:2 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,3. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

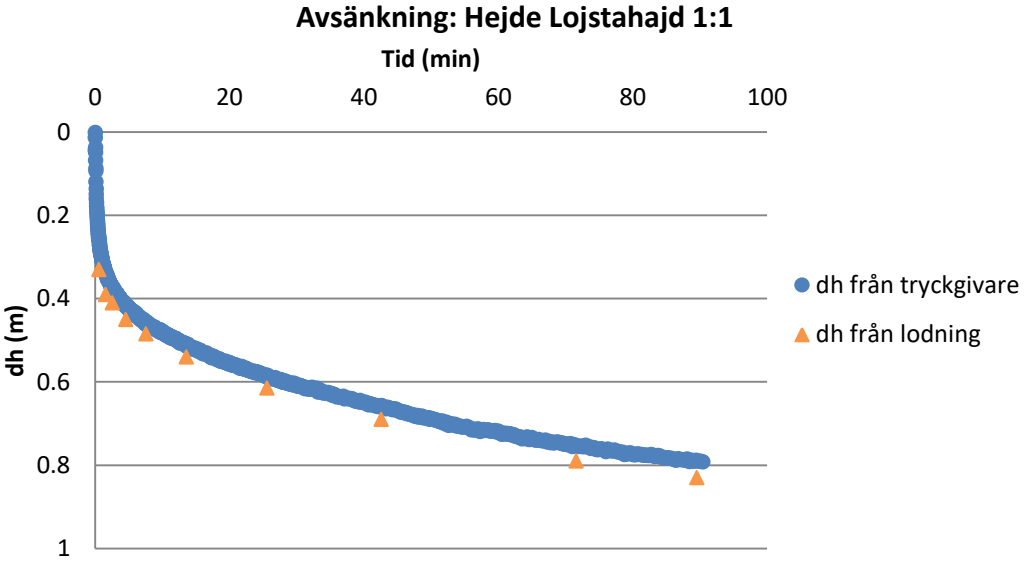
Hejde Lojstahajd 1:1

Under provpumpning i Hejde Lojstahajd 1:1 startade flödet på 0,55 liter/s, pendlade något inledningsvis men stabiliserades efter några minuter. Under mätningens gång minskade flödet sakta till 0,53 liter/s. Lufttrycket var relativt konstant under testet, se Figur C.26. Vattentrycket minskade från 223 till ca 215 kPa.

I Figur C.27 visas avsänkningen under pumptestet i Hejde Lojstahajd 1:1 på totalt ca 0,8 m. Tryckgivarens uppmätta värden som justerats med det interpolerade lufttrycket anses rimliga genom god överensstämmelse med de lodade värdena.

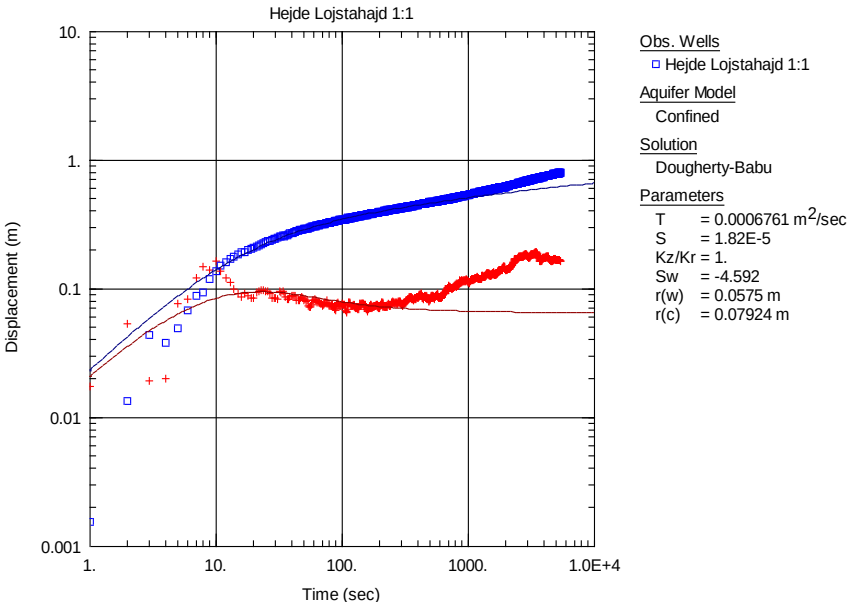


Figur C.26 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Hejde Lojstahajd 1:1. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.27 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Hejde Lojstahajd 1:1. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

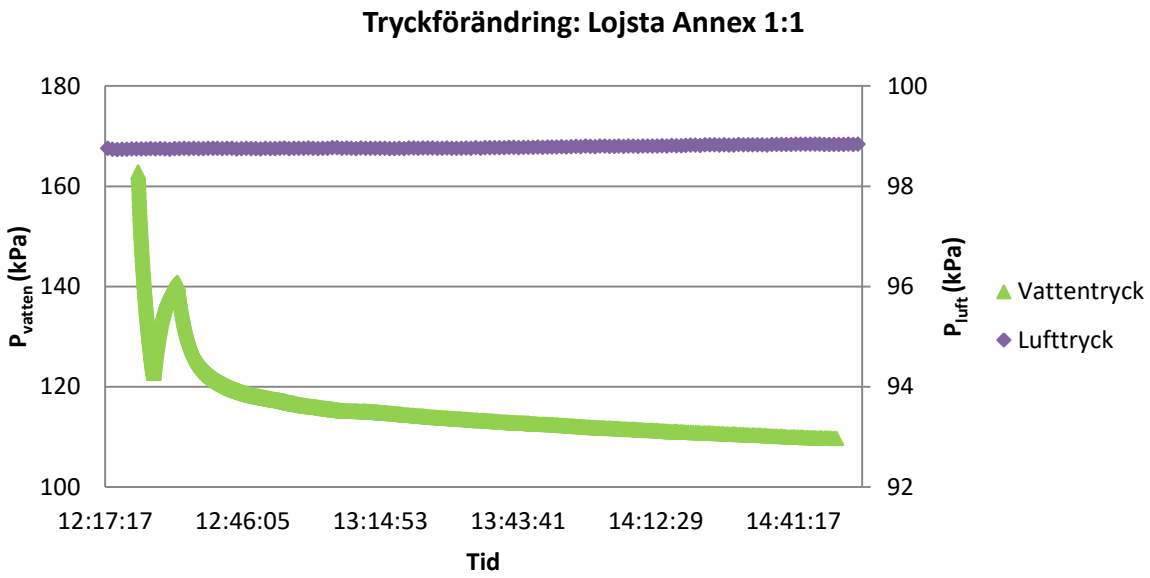
Den styrande flödesregimen för Hejde Lojstahajd 1:1 är troligtvis pseudo-radiell (PRF) efter ca 10 s som är dominerade av brunnsmagasinseffekter (Figur C.28). Efter ca 400 s stiger derivatan ytterligare till vad som kan vara en påföljande PRF. Med ett stabilt flöde under provpumpning antas därför Dougherty & Babu (1984) vara bäst lämpad för modellanpassning. I figuren visas modellanpassningen där flödet har antagits till 0,55 liter/s för hela testet. Modellen stämmer väl överens med uppmätt data, och ger ett T_T på $6{,}8 \cdot 10^{-4}$ m^2/s. Värdet för transmissiviteten är något större än beräknat T_M på $2{,}3 \cdot 10^{-5}$ m^2/s.



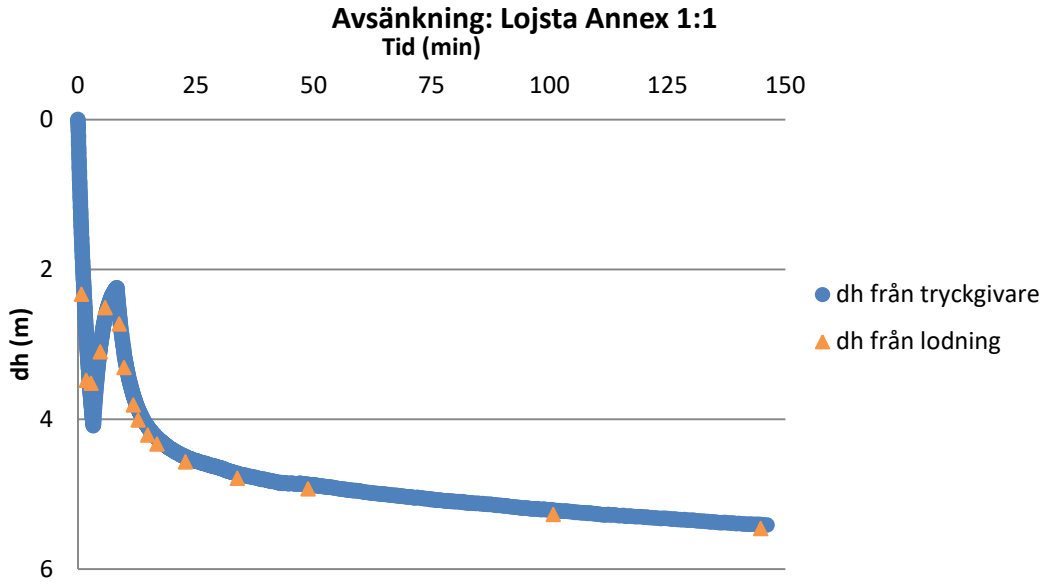
Figur C.28 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Hejde Lojstahajd 1:1 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

Lojsta Annex 1:1

Pumptestet i Lojsta Annex 1:1 inleddes med ett flöde på 0,51 liter/s och frekvensen 400 Hz. Grundvattennivån låg då på 8,22 m u rök. Under mätningen sänktes frekvensen till 201,9 Hz och genom det flödet till 0,2 liter/s på grund av den stora initiala avsänkningen. När avsänkningen då verkade avstanna höjdes frekvensen igen till 300,1 Hz. Därefter var flödet relativt stabilt under mätningen på 0,35–0,37 liter/s. Ändringarna som gjordes ses tydligt hos vattentrycket i början av Figur C.29. Lufttrycket ökade marginellt under testet. Avsänkningen för Lojsta Annex 1:1 visas i Figur C.30 där de lodade värdena validerar tryckgivarens värden. Den totala avsänkningen var ca 5,5 m.



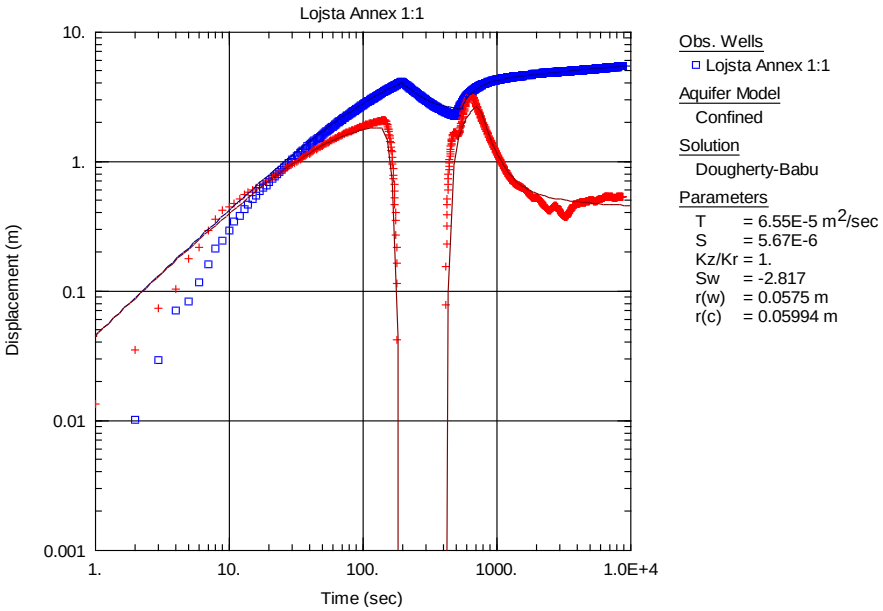
Figur C.29 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Lojsta Annex 1:1. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.30 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Lojsta Annex 1:1. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.31 ses provpumpningen för Lojsta Annex 1:1 i AQTESOLV. På grund av att avsänkningen stannade av vid den första ändringen i frekvens som gjordes under testet är det svårt att avgöra vilken flödesregim som styr. Efter ca 600 s ses en kort utplaning av derivatan där en pseudo-radiell flödesregim kan dominera. Även i slutet av testet planar derivatan ut. Därför har Dougherty & Babus modell (1984) använts för att bestämma transmissiviteten. Modellanpassningen för provpumpningen visas i Figur

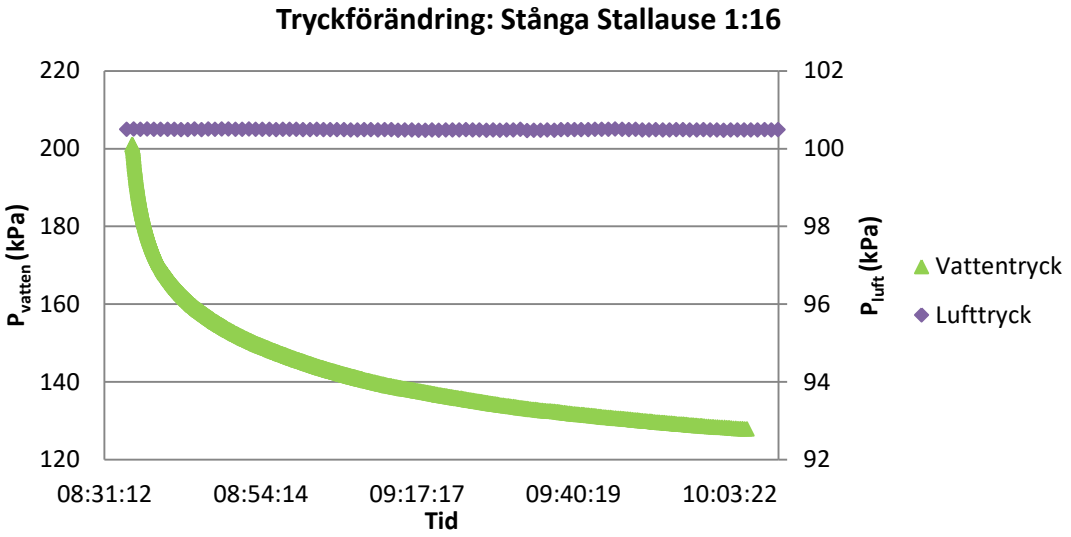
C.31. En relativt god överensstämmelse med data ses efter ca 450 s. Initialt överskattas avsänkningen. Det skattade värdet T_T är $6{,}6 \cdot 10^{-5}$ m^2/s enligt modellen. T_M är av samma storleksordning på $7{,}9 \cdot 10^{-5}$ m^2/s.



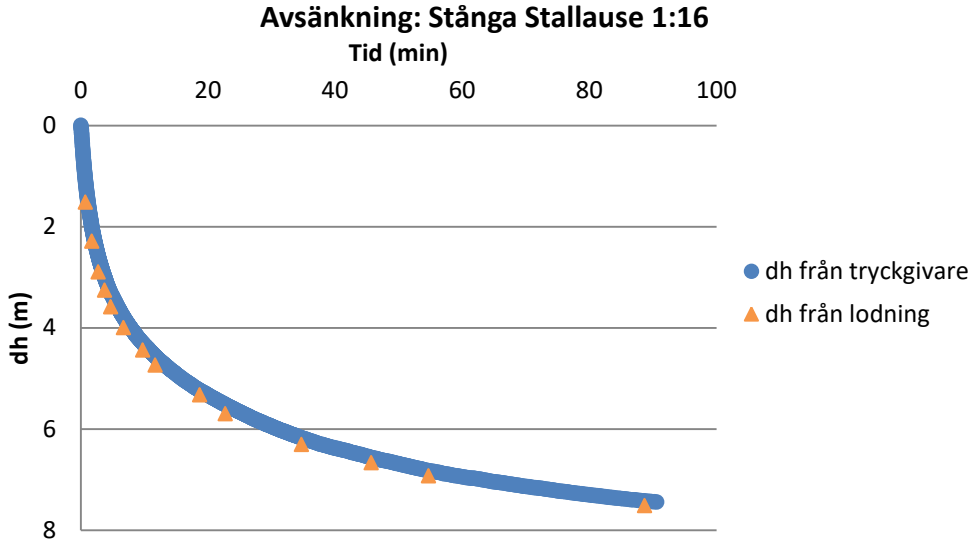
Figur C.31 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Lojsta Annex 1:1 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,3. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

Stånga Stallause 1:16

Flödet var inte helt stabilt under mätningen utan fladdrade mer eller mindre under hela mätningen. Vid pumpstart var flödet 0,54 liter/s som sedan minskade till 0,51 liter/s i slutet av testet. I Figur C.32 ses hur vattentrycket i borrhålet förändrades från ca 200 till 128 kPa. Lufttrycket var konstant ca 101 kPa vid markytan. Figur C.33 visar den framtagna avsänkningen från uppmätt data från tryckgivaren i borrhålet i Stånga Stallause 1:16. Den totala avsänkningen på nästan 7,5 m styrks av de motsvarande lodade värdena.



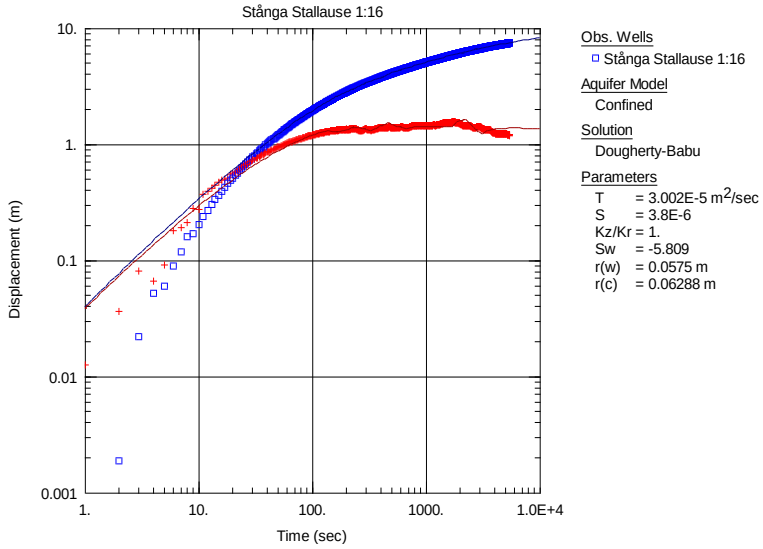
Figur C.32 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning i Stånga Stallause 1:16. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.33 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Stånga Stallause 1:16. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.34 ses avsänkningen för Stånga Stallause 1:16 i AQTESOLV. Från 100 s och framåt planar derivatan ut vilket kan indikera en pseudo-radiell fas som styrande flödesregim. Den kvalitativa analysen stärker detta antagande. Dougherty & Babus modell (1984) har därför använts för den kvantitativa analysen. Framåt slutet av mätningen ser derivatan ut att börja avta, men det är svårt att avgöra. I figuren visas även modellanpassningen för Stånga Stallause 1:16. Att kurvanpassningen till derivatan inte är helt jämn beror på de små ändringar i flödet som noterades under testet som ses

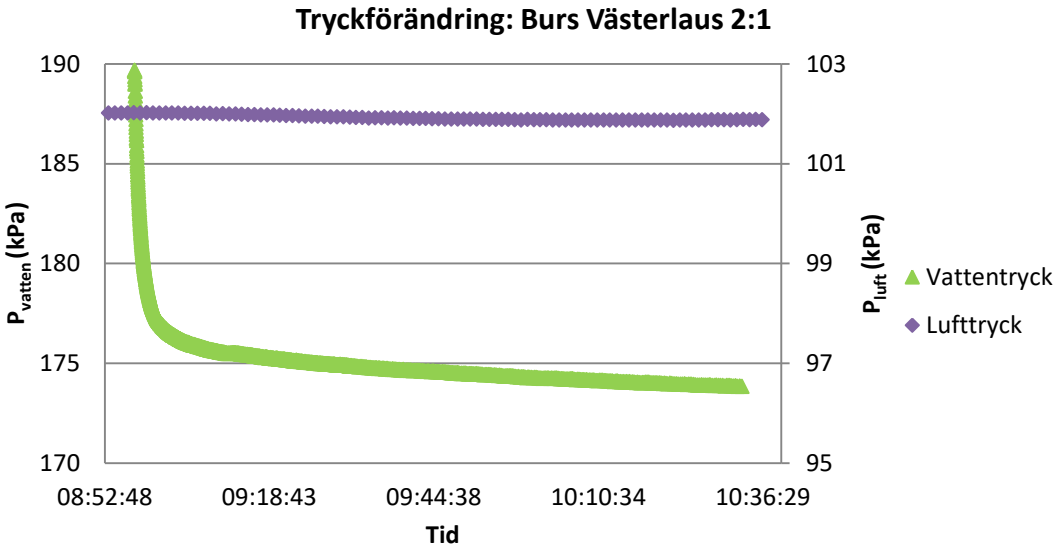
efter ca 150 s. Passningen stämmer väl överens med data undantaget när pumpning av brunnsmagasin dominerar flödesbilden. Utvärderingen av det transienta förloppet ger ett T_T på $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ m^2/s vilket kan jämföras med T_M på $7{,}0 \cdot 10^{-5}$ m^2/s av samma storleksordning.



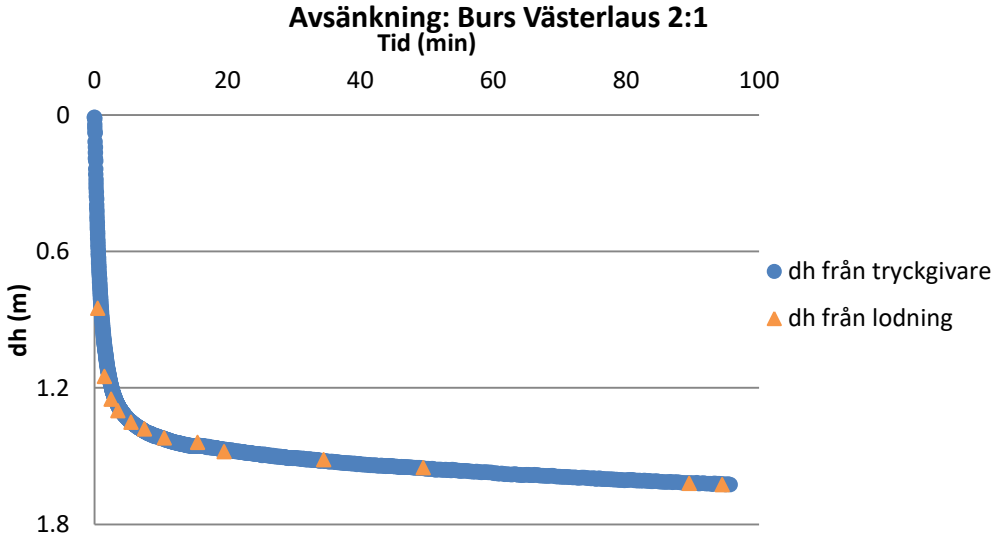
Figur C.34 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Stånga Stallause 1:16 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

Burs Västerlaus 2:1

Mätningen genomfördes med en frekvens på 302,9 Hz. Inledningsvis fanns ett litet läckage av droppande vatten där slang från bobinen går till flödesmätaren. Några droppar hann läcka innan det drogs åt under första minuten. Flödet pendlade något i början, men var stabilt efter hand på mellan 0,39–0,40 liter/s. I Figur C.35 ses hur de uppmätta vatten- och lufttrycksvärdena förändrades under provpumpning i Burs Västerlaus 2:1. Lufttrycket var konstant på ca 102 kPa medan vattentrycket ändrades från 190 till 174 kPa. De lodade grundvattennivåerna överensstämmer med tryckgivarens uppmätta värden, Figur C.36. Den totala avsänkningen blev 1,63 m.

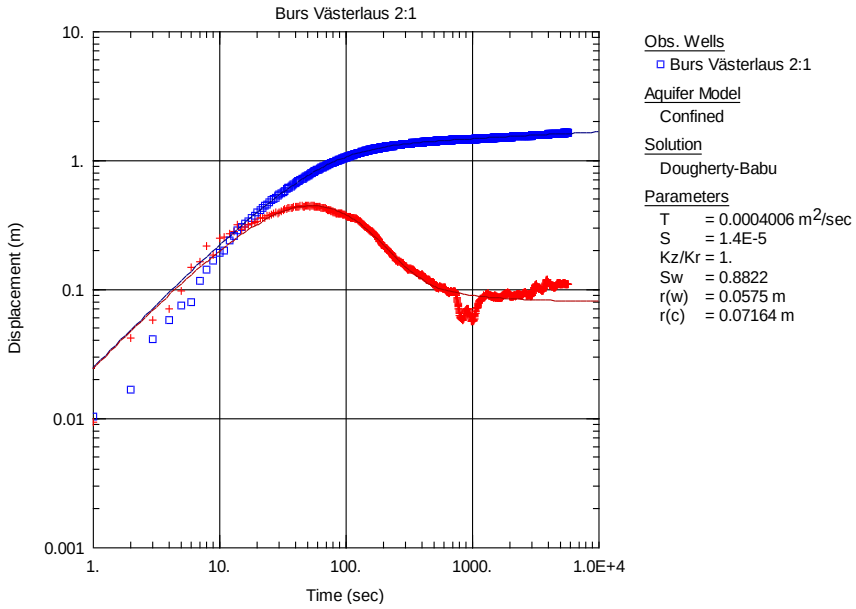


Figur C.35 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning Burs Västerlaus 2:1. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.36 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Burs Västerlaus 2:1. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I AQTESOLV har avsänkningens tidsderivata beräknats (Figur C.37). Brunnsmagasins-effekt ses under de första tjugo sekunderna innan derivatan planar ut. Flödesregimen antas vara pseudo-radiell vilket anses rimligt då testet hade ett konstant flöde. Detta styrks genom kvalitativ utvärdering med Barker (1988). Modellen av Dougherty & Babu (1984) har därför använts för den kvantitativa utvärderingen. I modellen har flödet antagits som konstant på 0,40 liter/s. Transmissiviteten skattas till $4{,}0 \cdot 10^{-4}$ m^2/s och kan ses i relation till T_M på $2{,}8 \cdot 10^{-4}$ m^2/s som är av samma storleksordning.

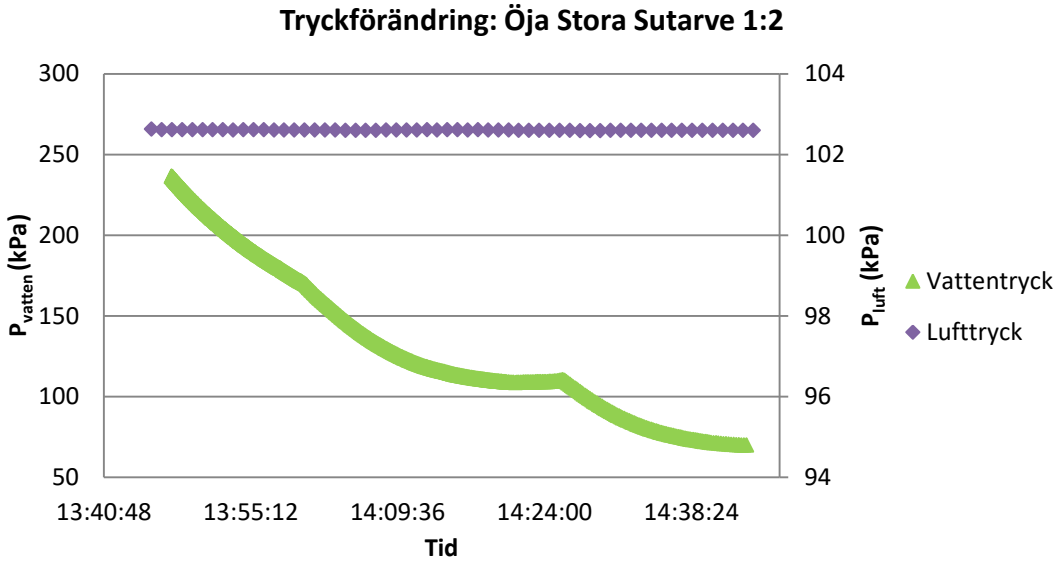


Figur C.37 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Burs Västerlaus 2:1 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

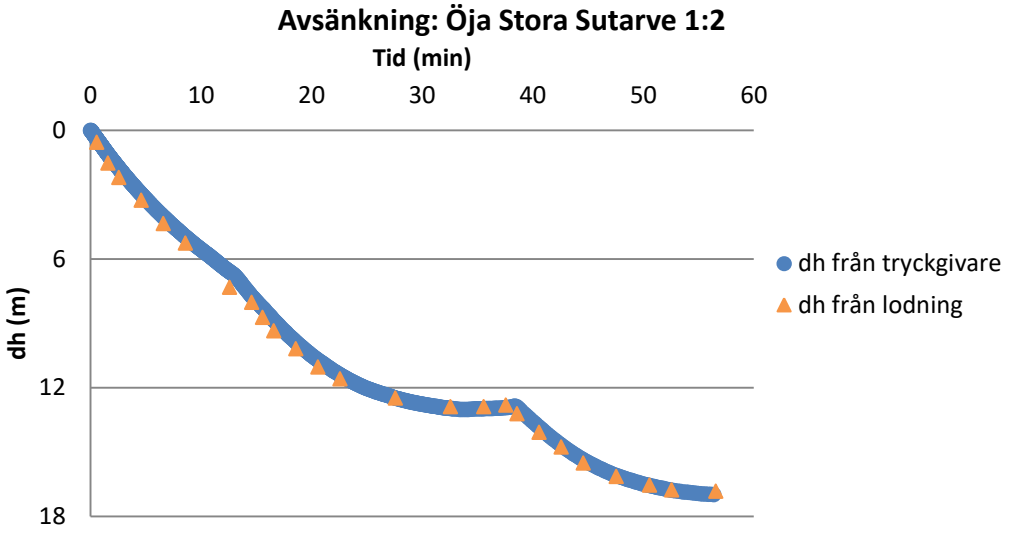
Öja Stora Sutarve 1:2

Ett veck på slangen upptäcktes alldeles vid pumpen, men det rätades ut vid nedsänkningen av pumpen. Innan mätningen låg grundvattenytan på 0,21 m u rök, och höjdes först upp till röröverkanten vid nedsänkningen av utrustning. Dock återhämtade sig nivån till 0,21 m u rök igen innan pumpstart. Enligt brunnsprotokollet var kapaciteten 0 liter/tim varpå mätningen genomfördes med en låg frekvens på 125,3 Hz. Frekvensen ökades till 150,2 respektive 170,1 Hz efter hand. Eftersom att avsänkningen blev stor stabiliserades inte flödet utan sänktes i takt med att lyfthöjden ökade. Flödet var initialt 0,18 liter/s och sjönk successivt ned till 0,04 liter/s. Därför var det en svår mätning att genomföra. När flödet sänktes ytterligare avslutades testet utan att vattenprover hade hunnit tas.

I Figur C.38 visas tryckförändringar i luft- och vattentryck för borrhålet. Lufttrycket är konstant medan vattentrycket minskar. På två ställen ändrar vattentrycket riktning vilket avspeglar ändring i pumpfrekvens. Dessa ändringar ses även i Figur C.39 som visar avsänkningen. Tryckgivarens uppmätta värden för avsänkningen bekräftas av de lodade, med en total sänkning av grundvattennivån på 17 m.

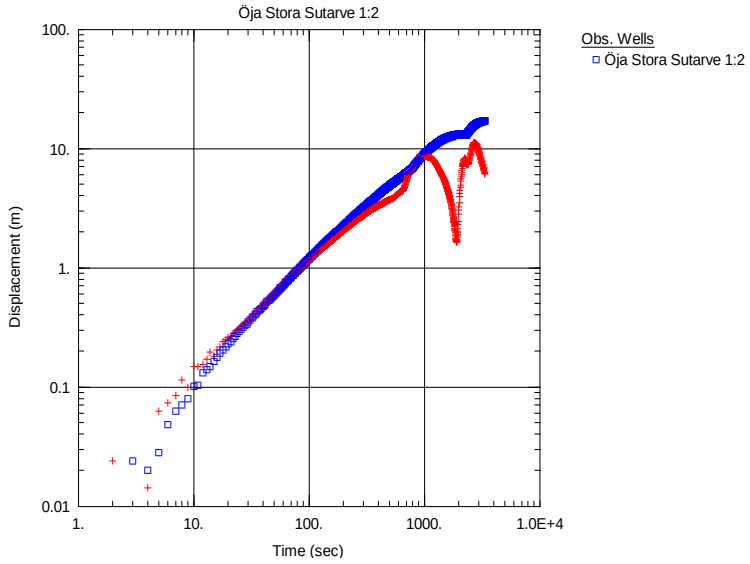


Figur C.38 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning Öja Stora Sutarve 1:2. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.39 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Öja Stora Sutarve 1:2. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.40 visas provpumpningens avsänkning med samt dess tidsderivata. Spanes metod (1993) användes för att ta fram derivatan med ett värde på 0,2. Fram till ca 700 s dominerar brunnsmagasinseffekter som sedan övergår i två möjliga pseudo-radiella faser som följer på varandra. Eftersom att flödet minskade under testet var dominerande flödesregim svårt att bedöma. Ingen passning är möjlig med modell från Barker (1988) vilket påvisar denna svårighet. Dougherty & Babu (1984) användes för kurvanpassning, men ingen entydig lösning kunde erhållas. T_M beräknades till $2{,}6 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.

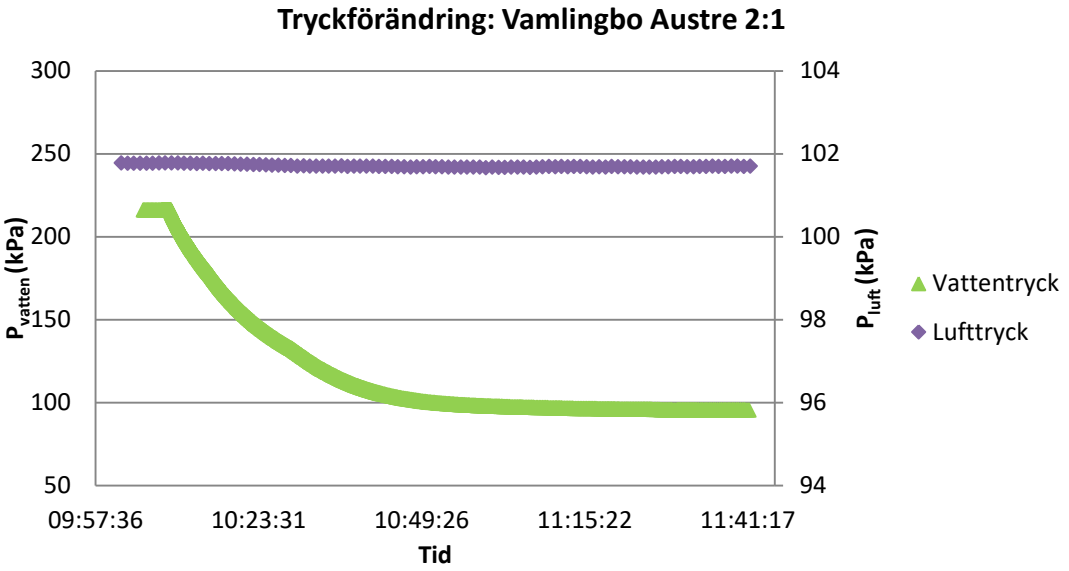


Figur C.40 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala Öja Stora Sutarve 1:2 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2.

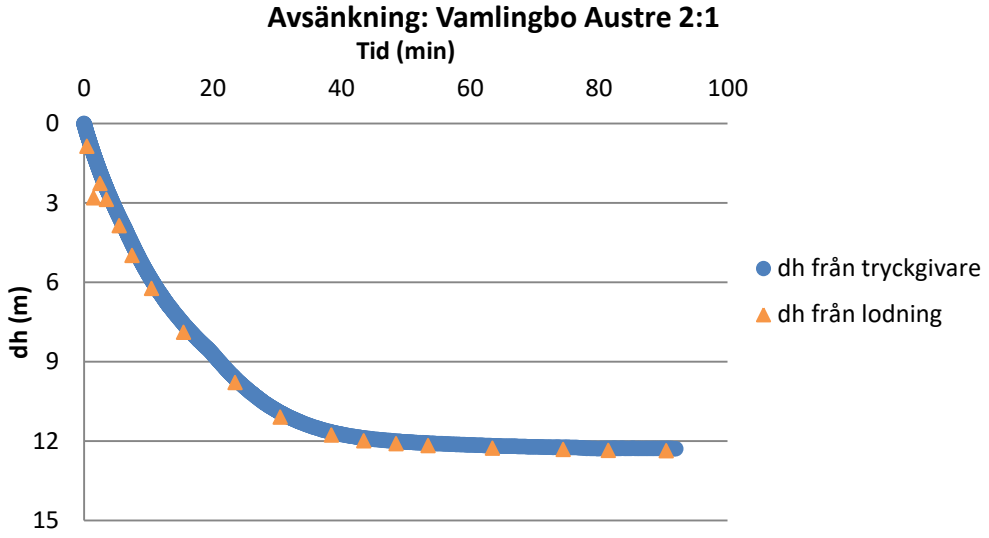
Vamlingbo Austre 1:2

Borrhålets foderrör hade rensats dagen innan från borrkax. Mätningen utfördes med en lägre frekvens på 152,5 Hz på grund av den låga kapaciteten som uppmätts vid borrning. Kabelljuslodet sprakade och var svårt att använda vilket kan bero på den tunna hinna med ljus olja som fanns kvar på lodet från borrhålet Vamlingbo Storms 4:1.

I Figur C.41 visas tryckförändringen för vatten och luft under pågående pumptest. Figur C.42 visar avsänkningens förlopp över tid. Under mätningen var lufttrycket nära konstant, och den totala avsänkningen drygt 12 m. På grund av den stora lyfthöjden minskade flödet successivt från 0,19 liter/s till 0,042 liter/s. Minskningen var störst under mätningens första halvtimme och stabiliserades under sista timmen när avsänkningen avtog. Ett test genomfördes kl. 11:26 med hink och klocka med resultatet 0,047 liter/s som stämmer överens med flödesmätarens värde kl. 11:24 på 0,043 liter/s. De lodade grundvattennivåerna indikerar att tryckgivarens uppmätta värden är rimliga.



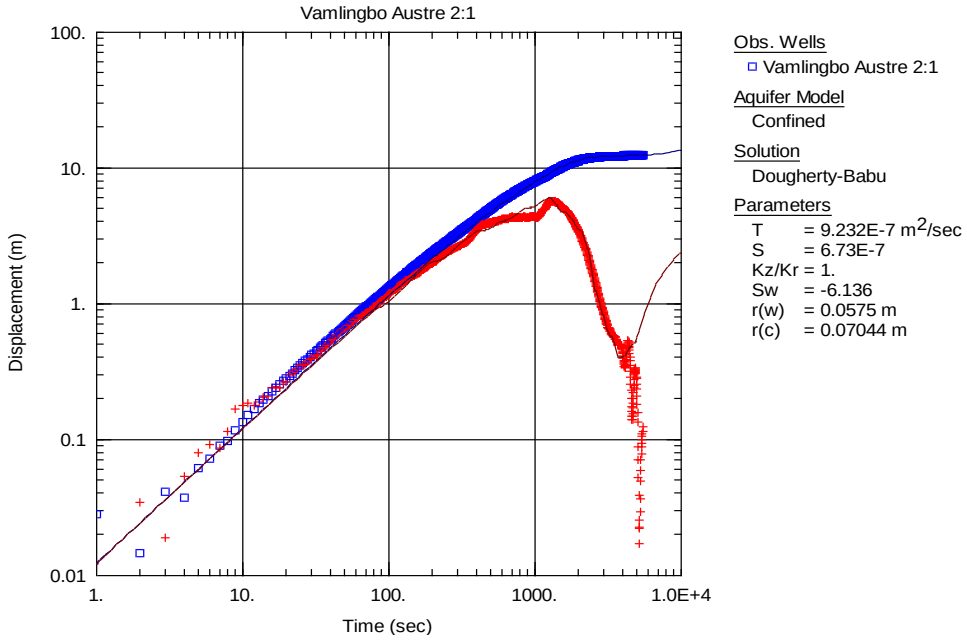
Figur C.41 Vatten- och lufttryckets förändring över tid (kPa) under provpumpning Vamlingbo Austre 2:1. Vattentrycket avser uppmätta värden med tryckgivare i borrhålet som korrigerats med uppmätta värden för lufttrycket. Lufttrycket avser värden uppmätta med givare vid markytan.



Figur C.42 Avsänkningens, dh (m), förlopp över tid (s) för Vamlingbo Austre 2:1. Både beräknade värden från tryckgivaren som är justerade för lufttrycket samt uppmätta värden från kabelljuslodning visas.

I Figur C.43 ses avsänkningskurvan för pumptestet samt dess tidsderivata. Derivatan har beräknats med Spanes metod (1993) med ett värde på 0,2 för att minska brusigheten. Den kvalitativa utvärderingen visar att testet fram till ca 400 s initialt är starkt påverkad av brunnsmagasinseffekter. Den dominerande flödesregimen kan mycket väl vara pseudo-radiell (PRF), men det är på grund av minskande flöde under testet svårt att fastslå detta. Dock visar passning med modellen av Dougherty & Babu (1984) relativt god överensstämmelse med data vilket tyder på att ett antagande om PRF under testet är

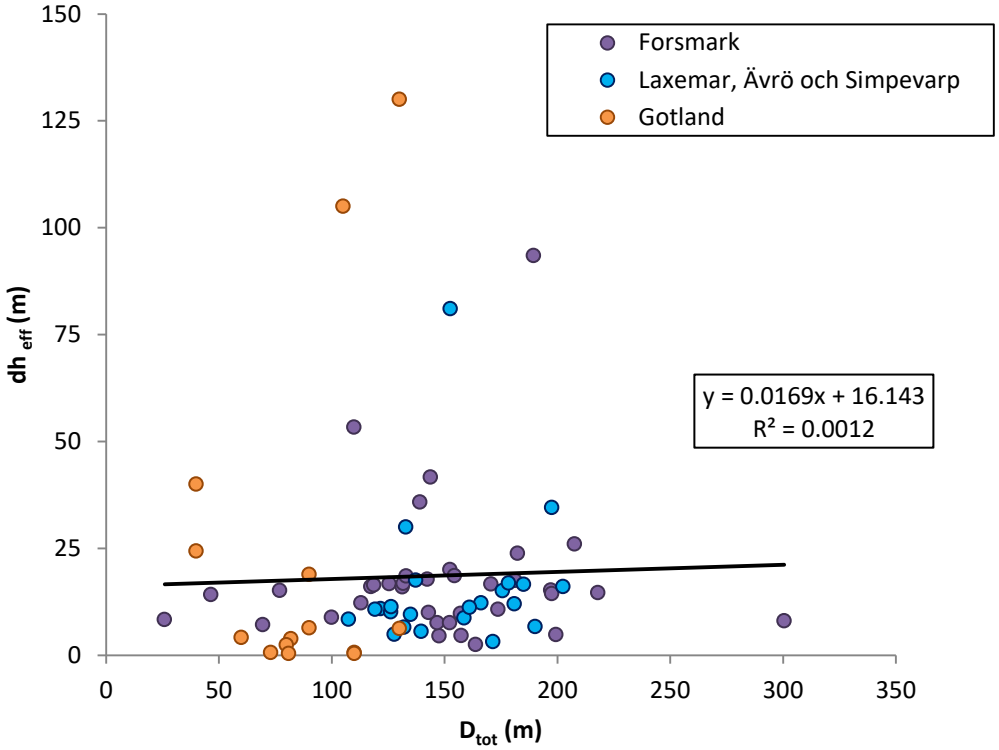
rimlig. I figuren visas kurvanpassningen som gav ett värde på T_T på $9{,}2 \cdot 10^{-7}$ m^2/s. Värdet är mindre än T_M som bestämdes till $3{,}6 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.



Figur C.43 Avsänkningens förlopp (m) över tid (s) i logskala för Vamlingbo Austre 2:1 i AQTESOLV. De blå värdena visar avsänkningen från uppmätt data som justerats för lufttryck och de röda visar derivatan. Vald metod för derivatan är Spanes metod (1993) med ansatt värde 0,2. Kurvanpassning med Dougherty & Babu (1984) visas med mörkblå och mörkröd kurva.

APPENDIX D – EFFEKTIV AVSÄNKNING SOM FUNKTION AV BRUNNSDJUP

En förutsättning för användandet av den effektiva avsänkningen, dh_{eff}, för att ta fram ett samband där transmissiviteten skattas utifrån uppmätt kapacitet från kapacitets-bestämning vid borrning är att dh_{eff} är oberoende av borrhålsdjupet. I Figur D.1 visas dh_{eff} beräknat för enskilda brunnar för all använd data plottat mot borrhålsdjupet. I de fall där dh_{eff} översteg brunnsdjupet sattes avsänkningen till borrhålslängden. Med linjär regression för all data erhålls ett r^2 på 0,0012 och ett p-värde på 0,77. Därför anses det rimligt att använda den effektiva avsänkningen för att ta fram ett samband för uppskattning av transmissivitet.



Figur D.1 Förhållandet mellan den antagna effektiva avsänkningen (dh_{eff}) och brunnsdjupet (D_{tot}) för all använd data. Brunnsdjupet avser det vertikala borrhålsdjupet. De lila datapunkterna är från Forsmark medan de blå är från Laxemar, Ävrö och Simpevarp. Orangea datapunkter är från Gotland.