



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 14 009

Examensarbete 30 hp  
Maj 2014

# Skattning av den integrerade hydrauliska konduktivitetens variation kring Tunåsens infiltrationsanläggning

En utredning av påverkan från möjliga osäkerheter  
i befintlig information

---

Angelica Hummel

## Referat

### Skattning av den integrerade hydrauliska konduktivitetens variation kring Tunåsens infiltrationsanläggning - En utredning av påverkan från möjliga osäkerheter i befintlig information

*Angelica Hummel*

I Sverige utgörs nästan hälften av den totala dricksvattenvolymen av grundvatten. Den största delen av grundvattnet utvinns ur rullstensåsar, vilka i vissa fall tillåter mycket stora uttag. Trots detta är grundvattenvolymen på vissa håll inte tillräcklig. Detta har lett till att den naturliga grundvattenmängden i sex procent av landets grundvattentäkter kompletteras genom konstgjord infiltration. I Uppsala sker konstgjord infiltration på fyra platser, där Tunåsens infiltrationsanläggning belägen på Uppsalaåsen är den största.

För Tunåsen såväl som för andra områden där konstgjord infiltration används, är det av stor betydelse att det infiltrerade vattnet har en tillräckligt lång transporttid mellan infiltrations- och uttagspunkt för att möjliggöra att det får grundvattenliknande egenskaper innan det pumpas upp. Ett sätt att uppskatta denna transporttid är genom att modellera grundvattenflödet i området mellan infiltrationsanläggningen och den eller de grundvattentäkter där vattnet pumpas upp. Till följd av att grundvattenströmningen i rullstensåsar ofta är komplex, ställer dock en modellering av ett sådant område stora krav på både kvalitet och upplösning hos den information från vilken modellen byggs upp.

Syftet med detta examensarbete var att dokumentera variationen i en skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet och utvärdera hur denna påverkades av osäkerheter relaterade till den idag befintliga informationen för området mellan Tunåsens infiltrationsanläggning och Storvads respektive Galgbackens grundvattentäkt. Detta gjordes som en förstudie till Uppsala vatten och avfall ABs kommande arbete med upprättandet av en noggrann modell över hela Uppsala- och Vattholmaåsen. Arbetet började med en litteraturstudie och en informationsinsamling, genom vilka den idag tillgängliga informationen sammanställdes. Utifrån den sammanställda informationen beräknades sedan värden på hydraulisk konduktivitet baserat på beskrivningarna i de upprättade lagerföljderna och baserat på information från tidigare utförda siktanalyser. De beräknade värdena jämfördes därefter med värdena framtagna genom en överslagsberäkning baserad på information om grundvattenflöde och hydraulisk gradient.

Sammanställningen av befintlig information visade på att de mest betydande osäkerheterna var relaterade till jordlagerdata, där de kunde kopplas till såväl användandet av olika beskrivningssätt i lagerföljderna som till brister i informationen om verklig kornstorleksfördelning. Skattningarna av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet resulterade i störst variation när de baserades på jordlagerföljderna, då det högsta värdet i många fall var  $10^7$  gånger så stort som det lägsta. De beräkningar som utfördes på siktanalyser visade på en mer begränsad variation, vilket även var fallet för överslagsberäkningarna. Utan mätningar på den verkliga hydrauliska konduktiviteten går det dock inte att säkert avgöra hur mycket de funna osäkerheterna påverkar variationen. Inför utvecklingen av den kommande modellen är det därför nödvändigt att komplettera den idag befintliga informationen med ny data, till exempel genom att provpumpningar utförs.

**Nyckelord:** Skattad integrerad hydraulisk konduktivitet, variation, osäkerhet, grundvattenmodellering, rullstensås, Tunåsen, Uppsalaåsen.

## **Abstract**

### **Estimation of the variation in the integrated hydraulic conductivity around the Tunåsen infiltration facility - An investigation of the effects of uncertainties in existing information**

*Angelica Hummel*

Almost half of Sweden's drinking water volume is produced from groundwater. The main fraction of this is extracted from eskers, some of which allow for very large extraction rates. Despite this, the groundwater volume is not sufficient in some areas. This has led to an extensive use of artificial recharge.

In Uppsala, the total volume added through artificial recharge is divided between four infiltration facilities. The largest of these facilities is Tunåsen basin infiltration facility, which is situated along the Uppsala esker. For Tunåsen as well as for other recharge facilities, it is of great importance that the infiltrated water is allowed a sufficient transport time before it is extracted further down the flow path. This is in order to ensure that the water obtains characteristics similar to those of natural groundwater. A way to estimate the transport time is to model the groundwater flow in the area between the infiltration facility and the extraction site. However, due to the fact that groundwater flow in eskers often is very complex, modeling such a system requires data of high quality and resolution.

The aim of this master's thesis was to document the variation in estimated values of integrated horizontal hydraulic conductivity and to investigate how the variation was affected by uncertainties connected to existing information for the area between the Tunåsen infiltration facility and the extraction sites in Storvad and Galgbacken. The thesis was done as a pilot study for Uppsala vatten och avfall AB's upcoming construction of a high-resolution model of the Uppsala and Vattholma eskers.

The investigation began with a literature review, from which existing information was compiled. An integrated horizontal hydraulic conductivity was calculated based on two types of information: descriptions of the layers in borehole profiles and information from sieve analyses. The obtained values were then compared to a rough estimate based on information about groundwater flow and hydraulic gradient.

The compilation of existing material showed that the largest uncertainties were related to borehole profiles. This was due to the use of different ways to describe soil layers and to lack of information of a soil layer's true grain size composition. The calculations of integrated hydraulic conductivity showed the largest variation when based on descriptions of borehole profiles. The calculations that were made based on sieve analyses as well as the rough estimate based on groundwater flow and hydraulic gradient showed a smaller variation.

However, without the existence of measurements of the actual hydraulic conductivity, it is impossible to say for certain how the documented uncertainties affect the variation. In the upcoming work with the construction of the high-resolution model it is therefore of great importance that such information is obtained, for example by performing pumping tests.

**Keywords:** Estimated integrated hydraulic conductivity, variation, uncertainty, groundwater modeling, esker, Tunåsen, Uppsala esker.

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

## FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör det avslutande momentet på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet har utförts under HT 2013 vid Uppsala vatten och avfall i Uppsala. Ämnesgranskare har varit Roger Herbert vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, Vatten-, och landskapslära vid Uppsala universitet. Handledare har varit Philip McCleaf på Uppsala vatten och avfall samt Jean-Marc Mayotte vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Denna rapport är resultatet av hårt arbete och mycket hjälp från många otroligt duktiga personer, vilka jag här nedan vill tacka. Ett första tack riktas till Jean-Marc, som genom hela arbetet bidragit med en stor mängd entusiasm och idéer och som har jobbat mycket hårt med att bygga upp och få den matematiska modellen att fungera. Jag vill tacka Philip för hjälp med att leta i arkiven, samt för hjälp med att förklara hydrologiska koncept och svara på frågor rörande grundvattenanvändningen i Uppsala. Ett stort tack även till Roger som under arbetet har bidragit med många värdefulla råd och kommentarer relaterade till såväl rapportskrivningen som till upplägget av arbetet i stort. Karin Wertsberg, Jeanette Sipilä och Alexej Paptchikhine vill jag tacka för ovärderlig hjälp med att få tillgång till data från Uppsala vatten och avfalls interna system.

Slutligen vill jag tacka vänner och familj för det stöd jag fått under dessa månader. Ett speciellt tack till Max som hela tiden hjälpt mig att se framåt och till pappa för att outtröttligt ha korrekturläst rapporten. Tack även till alla på Gränby vattenverk för att de bidragit med glada miner genom hela arbetet.

Angelica Hummel

Uppsala, mars 2014

Copyright © Angelica Hummel och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W 14 009, ISSN 1401-5765.

Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2014.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

### Skattning av den integrerade hydrauliska konduktivitetens variation kring Tunåsens infiltrationsanläggning - En utredning av påverkan från möjliga osäkerheter i befintlig information

*Angelica Hummel*

I Uppsala erhålls det vatten som används för dricksvattenproduktion till stor del från Uppsalaåsen. Detta är möjligt genom de mycket vattenförande jordlager som bildades i samband med att den senaste inlandsisen drog sig tillbaka. Trots att det finns stora mängder vatten naturligt, räcker de i Uppsala inte till. De kompletteras därför genom att vatten från Fyrisån pumpas upp på åsen, där materialet är genomsläppligt och varifrån det är möjligt för vattnet att sakta ta sig nedåt genom åsmaterialet.

När vattnet rör sig genom marklagren sker processer som gradvis reducerar mängden virus och andra sjukdomsframkallande organismer i vattnet och på andra sätt leder till att vattnet får egenskaper som liknar det naturligt förekommande vattnet. För att dessa processer ska kunna ske fullt ut krävs dock att vattnet tillbringar tillräckligt lång tid i marken innan det pumpas upp för att användas i dricksvattenproduktionen. Eftersom vattnet från att det pumpats upp på åsen helt rör sig under markytan, är det dessvärre svårt att med säkerhet avgöra vart det tar vägen och hur lång tid det tar.

Transporttiden kan dock uppskattas genom att använda en modell, vilken byggs upp för att efterlikna området i så hög grad som möjligt. Till följd av att det är mycket svårt att helt korrekt avbilda verkligheten, kommer denna modell alltid att innebära en förenkling av grundvattensystemet. I och med detta kommer det finnas osäkerheter kring det resultat som modellen ger. Dessa osäkerheter kan härledas till såväl brister i modellens uppbyggnad som till osäkerheter i de i modellen använda parametervärdena. Genom att noggrant kartlägga osäkerheterna är det möjligt att skapa sig en uppfattning om inom vilka områden osäkerheten kan minskas.

Detta examensarbete fungerade som en förstudie till Uppsala vatten och avfall ABs kommande uppbyggnad av en modell, vilken avser täcka hela Uppsalaåsen och Vattholmaåsen. Arbetets fokus låg på att dokumentera variationen i uppskattningar av åsens vattengenomsläppande förmåga och utvärdera hur denna påverkades av osäkerheter i den idag befintliga informationen kring området mellan Tunåsens infiltrationsanläggning och uttagspunkterna i Storvad och Galgbacken.

Genom en utförlig litteraturstudie och informationsinsamling sammanställdes den idag befintliga informationen kring bland annat jordlagerföljder och mängder som pumpas upp på åsen respektive tas ut för att användas i dricksvattenproduktionen. Utifrån detta utfördes sedan beräkningar på hydraulisk konduktivitet, vilket är det mått som används för ett materials vattengenomsläppande förmåga.

Beräkningarna utfördes på tre olika sätt, där varje sätt baserades på olika typer av information. Den första beräkningen baserades på de beskrivningar om jordlagerföljder som upprättats i samband med att borrhningar sedan 50-talet utförts för att undersöka åsens uppbyggnad. Den andra beräkningen baserades på mer detaljerad information om varje lagers sammansättning av fint och grovt material, vilken även den kom från de utförda borrhningarna. Slutligen utfördes en beräkning baserad på en uppskattning om egenskaper hos det system som vattnet rör sig genom efter att det tagit sig ner genom det genomsläppliga materialet uppe på åsen. Varje beräkning resulterade i ett intervall med ett högsta och ett lägsta möjliga värde på den hydrauliska konduktiviteten. Anledningen till att tre olika beräkningsmetoder användes var för att möjliggöra en jämförelse av den osäkerhet olika typer av information bidrog med.

Resultatet av informationssammanställningen och beräkningarna visade att det finns stora osäkerheter i den idag befintliga informationen. Dessa osäkerheter var främst kopplade till Uppsalaåsens uppbyggnad och dess verkliga materialsammansättning. Utöver detta fanns det även stora osäkerheter kopplade till att det helt saknas information för många områden i åsen. Resultaten visade också att om beräkningar utförs baserat på jordlagerbeskrivningar, erhålls ett mycket stort intervall på den uppskattade genomsläppande förmågan. De intervall som erhöles baserat på den mer detaljerade informationen samt på uppskattningen av systemets egenskaper var mer realistiska.

Genom att öka detaljgraden i den information som ligger till grund för beräkningarna, verkar det därmed vara möjligt att minska den påverkan som osäkerheter har på den beräknade variationen i den genomsläppande förmågan. Innan en jämförelse mellan de beräknade värdena och verkligt uppmätta värden kan göras går det dock inte att säkert säga hur stor osäkerheternas påverkan är.

Inför den kommande uppbyggnaden av en noggrann modell anses det vara av yttersta vikt att komplettera den idag befintliga informationen med ny data. Detta skulle bland annat kunna göras genom nya undersökningar av åsens uppbyggnad och då speciellt i områden där tidigare data är knapp. Förslag på tillvägagångssätt är nya borrhningar, samt undersökningar av åsens verkliga genomsläppande förmåga.



## ORDLISTA

<b>Akvifer</b>	Ett eller flera genomsläppliga jord- och berglager där en betydande mängd vatten kan magasineras
<b>Grundvatten</b>	Vatten i markens mättade zon. Skiljs från vatten i den omättade zonen, vilket istället benämns markvatten
<b>Grundvattentäkt</b>	Område för utvinning av grundvatten
<b>Hydraulisk konduktivitet</b>	En beteckning som ofta används för markens genomsläpplighet med avseende på vatten
<b>Integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet</b>	Ett mått på en akvifers motstånd till vattenflödet i den horisontella riktningen
<b>Lagerföljd</b>	Beskrivning av den ordning i vilken jord- och bergartslager förekommer. Fastställs till exempel genom att borrhningar utförs
<b>Mäktighet</b>	Tjockleken hos en geologisk formation. Kan användas för enskilda jord- och berglager lika väl som för hela lagerföljder
<b>Mättad zon</b>	Den del av jordprofilen som befinner sig under grundvattenytan och där alla markens porer är vattenfyllda
<b>Observationsrör</b>	Rör nedsatta i marken i vilka bland annat grundvattenytans läge mäts
<b>Omättad zon</b>	Den del av jordprofilen som befinner sig mellan markytan och grundvattenytan, i vilken porerna mellan jordpartiklarna är fyllda med antingen luft eller vatten
<b>Osäkerhet</b>	Osäkerheter i uppskattningen av parametrar relevanta för grundvattnets transporttid. Detta innefattar såväl risken att detaljer går förlorade när en kvalitativ geologisk beskrivning överförs till en kvantitativ geologisk egenskap, som risken att parameterskattningen blir felaktig till följd av brister i ursprungsinformationen
<b>Variation</b>	Spannet mellan ett högsta och ett lägsta värde på skattad hydraulisk konduktivitet

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1	PROBLEMSTÄLLNING .....	2
1.2	SYFTE OCH MÅL .....	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR .....	2
<b>2</b>	<b>TEORI OCH BAKGRUND</b> .....	<b>4</b>
2.1	OMRÅDESBESKRIVNING .....	4
2.1.1	Uppsalaåsen .....	4
2.1.2	Tunåsens infiltrationsanläggning .....	5
2.1.3	Galgbackens grundvattentäkt .....	5
2.1.4	Storvads grundvattentäkt .....	6
2.2	EN RULLSTENSÅS BILDNING .....	6
2.3	GRUNDLÄGGANDE BEGREPP .....	6
2.3.1	Darcys lag och hydraulisk potential .....	6
2.3.2	Integrerad hydraulisk konduktivitet i parallella jordlager .....	8
2.3.3	Vattenbalans .....	8
2.3.4	Grundvattenströmning i rullstensåsar .....	9
2.3.5	Jordartsindelning och jordartsbenämning .....	9
2.3.6	Konceptuell modell .....	11
<b>3</b>	<b>METOD</b> .....	<b>12</b>
3.1	LITTERATURSTUDIE OCH INFORMATIONSSAMMANSTÄLLNING .....	12
3.2	BEARBETNING AV INSAMLAD INFORMATION .....	13
3.2.1	Jordlagerföljder .....	13
3.2.2	Förenkling av jordlagerföljder inför uppbyggnaden av den konceptuella modellen .....	15
3.2.3	Georeferering och framtagande av koordinater .....	16
3.2.4	Grundvattenuttag, infiltrationsmängd och grundvattennivåer .....	17
3.3	OSÄKERHETER I INDATA .....	19
3.3.1	Dokumentering av osäkerheter .....	19
3.3.2	Undersökning av jordlagrens kornstorleksfördelning .....	19
3.4	SKATTNING AV INTEGRERAD HORIZONTELL HYDRAULISK KONDUKTIVITET .....	21
3.4.1	Rimlighetsanalys av olika jordarters hydrauliska konduktivitet .....	21
3.4.2	Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på lagerföljdsbeskrivningar .....	21
3.4.3	Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på siktanalyser .....	22
3.4.4	Överslagsberäkning av hydraulisk konduktivitet baserad på grundvattenföring och hydraulisk gradient .....	23
3.5	UTVECKLING AV EN KONCEPTUELL MODELL .....	25
3.5.1	Avgränsningar, randvillkor och vattenbalans .....	25
3.5.2	Grundvattenuttag .....	25
3.5.3	Infiltrerad mängd .....	26
3.5.4	Grundvattenbildning .....	27
3.5.5	Grundvattennivåer .....	27
3.5.6	Hydraulisk konduktivitet .....	27
3.6	MODELLERING .....	27
3.6.1	Programvara för modellering .....	27
3.6.2	Implementering av konceptuell modell .....	27

3.6.3	Transporttid .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTAT.....</b>	<b>30</b>
4.1	LITTERATURSTUDIE OCH INFORMATIONSSAMLING .....	30
4.1.1	VBB: hydrogeologiska undersökningar .....	30
4.1.2	VBB: matematisk modell över Uppsalaåsen .....	30
4.1.3	Grundvattnets hastighet .....	31
4.1.4	Golder Geosystem AB och Golder Associates AB .....	32
4.1.5	Licentiatavhandlingar .....	32
4.1.6	Seismiska undersökningar .....	32
4.1.7	SGUs hydrogeologiska databas .....	33
4.2	INFORMATIONSSAMMANSTÄLLNING .....	33
4.3	DOKUMENTERADE OSÄKERHETER .....	33
4.3.1	Jordlagerdata.....	33
4.3.2	Koordinater .....	36
4.3.3	Grundvattenuttag .....	37
4.3.4	Infiltrerad mängd .....	37
4.3.5	Grundvattenbildning.....	38
4.3.6	Berggrundens läge .....	38
4.4	SKATTNING AV INTEGRERAD HYDRAULISK KONDUKTIVITET .....	39
4.4.1	Olika jordarters hydrauliska konduktivitet .....	39
4.4.2	Skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på lagerföljdsbeskrivningar .....	40
4.4.3	Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på siktanalyser .....	43
4.4.4	Överslagsberäkning av hydraulisk konduktivitet baserat på grundvattenföring och hydraulisk gradient.....	44
4.5	KONCEPTUELL MODELL .....	45
4.5.1	Avgränsningar, randvillkor och vattenbalans.....	45
4.5.2	Grundvattenuttag, infiltrerad mängd och grundvattenbildning .....	46
4.5.3	Hydraulisk konduktivitet .....	47
<b>5</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>48</b>
5.1	TILLGÄNGLIGT MATERIAL .....	48
5.2	VARIATIONER I SKATTNING AV DEN INTEGRERADE HYDRAULISKA KONDUKTIVITETEN .....	48
5.3	BERÄKNINGSMETODER .....	49
5.3.1	Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på jordlagerföljdsbeskrivningar.....	49
5.3.2	Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på siktanalyser .....	49
5.3.3	Överslagsberäkning av hydraulisk konduktivitet baserad på grundvattenföring och hydraulisk gradient.....	50
5.4	DEN KONCEPTUELLA MODELLEN .....	50
5.5	DEN SKATTADE VARIATIONENS PÅVERKAN PÅ TRANSPORTTIDEN.....	50
5.6	DISKUSSION KRING FORTSATT ARBETE .....	51
<b>6</b>	<b>SLUTSATS.....</b>	<b>53</b>
6.1	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE.....	53
<b>7</b>	<b>REFERENSER .....</b>	<b>54</b>
7.1	PUBLICERAT MATERIAL .....	54
7.2	PERSONLIG KOMMUNIKATION.....	58

7.3	KARTOR.....	58
<b>BILAGOR</b>	.....	<b>59</b>
	BILAGA A – MATERIALINDEX .....	59
	BILAGA B – GEOREFERERING AV UTFÖRDA REKOGNOSKERINGSBORRNINGAR .....	60
	BILAGA C – RESULTAT AV RIMLIGHETSANALYS.....	64
	BILAGA D – KORNSTORLEKSFÖRDELNINGAR .....	65
	BILAGA E – INTEGRERAD HORIZONTELL HYDRAULISK KONDUKTIVITET.....	81
	BILAGA F – SIMULERINGSRESULTAT .....	83
	BILAGA G – MATLABPROGRAM FÖR BERÄKNING AV HYDRAULISK KONDUKTIVITET ...	85

# 1 INLEDNING

Enligt uppgift från Sveriges geologiska undersökning, SGU, (2009) utgörs nästan hälften av Sveriges dricksvattenvolym av grundvatten. Den största delen av dessa grundvattenförekomster förekommer i rullstensåsar och i andra typer av sand- och grusavlagringar (SGU, 2009). Trots att det i Sverige finns gott om vattenförande strukturer är den naturliga grundvattentillgången på vissa håll inte tillräcklig för att möta dricksvattenbehovet (SGU, 2009). Vissa städer använder sig därför av konstgjord infiltration för att utöka grundvattenmängden (Tunemar m.fl., 2009).

En av de städer som till stor del använder konstgjord infiltration för att komplettera den naturliga grundvattenbildningen är Uppsala. För att möta efterfrågan infiltrerar Uppsala vatten och avfall AB (hädanefter kallat Uppsala vatten) dagligen omkring 26000 m<sup>3</sup> vatten från Fyrisån (Karin Wertsberg, personlig kommunikation, 2013-11-07), vilket i huvudsak fördelas på två infiltrationsanläggningar i Uppsalaåsen. Stora Vallskogs infiltrationsanläggning ligger mellan Uppsala och Bälinge och tar varje dygn hand om ca 9800 m<sup>3</sup> vatten från Fyrisån. Till Tunåsens infiltrationsanläggning precis norr om Uppsala pumpas från Fyrisån ca 16200 m<sup>3</sup> per dygn. Grundvattentillgången förstärks även i mindre skala genom infiltrationsanläggningar i Lövstalöt och Husby, norr respektive nordöst om centrala Uppsala.

Förutom det vattentillskott som den konstgjorda infiltrationen resulterar i, förlitar sig Uppsala vatten även på att åsen på ett tillförlitligt sätt bidrar till såväl filtrering av organiskt material som till inaktivering av de virus och andra sjukdomsframkallande organismer som följer med ytvattnet från Fyrisån. Genom ett antal processer i filterbassängerna och i de efterföljande jordlagren erhåller det infiltrerade vattnet gradvis mer grundvattenliknande egenskaper (Hansson, 2000; Sundlöf & Kronqvist, 1992). För att dessa processer ska vara möjliga krävs en tillräckligt lång transporttid mellan infiltrationspunkten och uttagpunkten. Enligt Livsmedelsverket (2006) måste ett infiltrerat ytvatten därför ha en uppehållstid på minst 14 dagar för att kunna räknas som grundvatten.

För att kunna uppskatta vattnets transporttid är det nödvändigt att veta hur systemet är uppbyggt. Då ett grundvattensystem till största delen finns under markytan är det dessvärre mycket svårt att helt veta vilka förhållanden som råder däri. En uppskattning av hur ett område fungerar kan emellertid göras genom att en modell skapas utifrån tillgänglig information över bland annat markens struktur och egenskaper. Denna modell kommer dock alltid att vara en förenkling av verkligheten, vilket leder till att det resultat som erhålls från simuleringarna alltid kommer att innehålla osäkerheter. Dessa osäkerheter kan härledas till såväl brister i modellens uppbyggnad som till osäkerheter i de ingående parametervärdena. En av dessa parametrar är den hydrauliska konduktiviteten, vilken genom att vara ett mått på hur väl ett material leder vatten har en central roll i grundvattenmodellering. I många fall finns det endast tillgång till mycket sparsam information om uppmätt hydraulisk konduktivitet. Istället måste då en skattad hydraulisk konduktivitet användas i modelleringen. Genom att utreda hur den skattade hydrauliska konduktiviteten varierar samt vad orsaken till dessa variationer kan vara, är det möjligt att skapa sig en uppfattning om inom vilka områden osäkerheterna relaterade till det modellerade resultatet kan reduceras. Detta är av stor betydelse för Uppsala vattens kommande arbete, i vilket målet är att konstruera en noggrann matematisk modell över Uppsalaåsen och Vattholmaåsen.

## 1.1 PROBLEMSTÄLLNING

Den grundvattenmodell som hittills använts för att modellera och uppskatta grundvattenflödet genom Uppsalaåsen och Vattholmaåsen stod klar i slutet av 1980-talet (Golder Geosystem AB, 1990) och är till stor del baserad på studier utförda upp till 40 år tidigare. Golder Geosystem ABs modell är en tvådimensionell modell med fokus på att utreda och uppskatta grundvattentillgångarna i Uppsalaåsen och Vattholmaåsen fram till år 2020. Efter att modellen togs fram har inget fortsatt arbete lagts på att varken uppdatera den eller på att utvärdera osäkerheter relaterade till de ingående modellparametrarna. Då Uppsalaåsen och Vattholmaåsen utgör större delen av Uppsala stads dricksvattentillgångar, finns det ett behov av att utreda grundvattnets uppehållstid i åsen och därmed få svar på huruvida åsen ger ett tillräckligt skydd mot virus, andra sjukdomsframkallande organismer och kemiska ämnen. Uppsala vatten har därför för avsikt att utveckla en ny modell, där modelltillförlitligheten kommer att ökas bland annat genom 3D-modellering och högre upplösning.

## 1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta examensarbete var att genom bearbetning av tidigare publicerat material undersöka variationen i en skattad integrerad hydraulisk konduktivitet baserat på olika typer av information. Detta gjordes för området mellan Tunåsens infiltrationsanläggning och Storvads respektive Galgbackens grundvattentäkt. De osäkerheter som kunde uppkomma vid överförandet av ursprungsinformation till såväl skattningen av den hydrauliska konduktiviteten som till andra parametrar dokumenterades också. För att uppnå syftet sattes fyra delmål upp:

- Utföra en litteraturstudie på tidigare skrivna rapporter samt sammanställa tillgänglig information i form av kartor, borrhålsprofiler och data över grundvattennivåer, infiltrationsmängder och uttagsmängder.
- Dokumentera osäkerheter hos den sammanställda informationen och utifrån dessa utreda variationen i en skattad hydraulisk konduktivitet för Uppsalaåsen och Vattholmaåsen.
- Konstruera en konceptuell modell över området mellan Storvads grundvattentäkt och Galgbackens grundvattentäkt.
- Diskutera och ta fram förslag på möjliga sätt att reducera osäkerheter inför framtida beräkningar av en skattad hydraulisk konduktivitet.

Arbetet gjordes som en förstudie till Uppsala vattens kommande projekt Funktionsanalys Uppsalaåsen.

## 1.3 AVGRÄNSNINGAR

Arbetet begränsades till att endast utreda variationer i en skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet. Variationen hos en skattad integrerad vertikal hydraulisk konduktivitet, det vill säga en akvifers motstånd till vattenflöde i vertikalt led, samt variationen i en uppmätt hydraulisk konduktivitet behandlades inte. Anledningen till att den horisontella och inte den vertikala hydrauliska konduktiviteten valdes var för att det främst var den huvudsakliga flödesriktningen som var av intresse i denna undersökning.

Dokumentering av osäkerheter relaterade till skattningen av den hydrauliska konduktiviteten skedde i den mån det var möjligt för hela Vattholmaåsen samt för Uppsalaåsen norr om Stadsträdgårdens grundvattentäkt. Osäkerheter relaterade till andra delar av den framtida modelluppbyggnaden dokumenterades också. Störst fokus lades på området mellan Storvads grundvattentäkt och Galgbackens grundvattentäkt, vilket framöver även kommer att kallas fokusområdet. Valet av fokusområde gjordes

utifrån att det är av stort intresse för Uppsala vatten. Anledningen till att osäkerheter dokumenterades för ett område större än fokusområdet samt för annat än hydraulisk konduktivitet var för att det till så stor grad som möjligt ska finnas lättillgänglig information inför Uppsala vattens kommande utveckling av en noggrann matematisk modell för hela Uppsalaåsen och Vattholmaåsen.

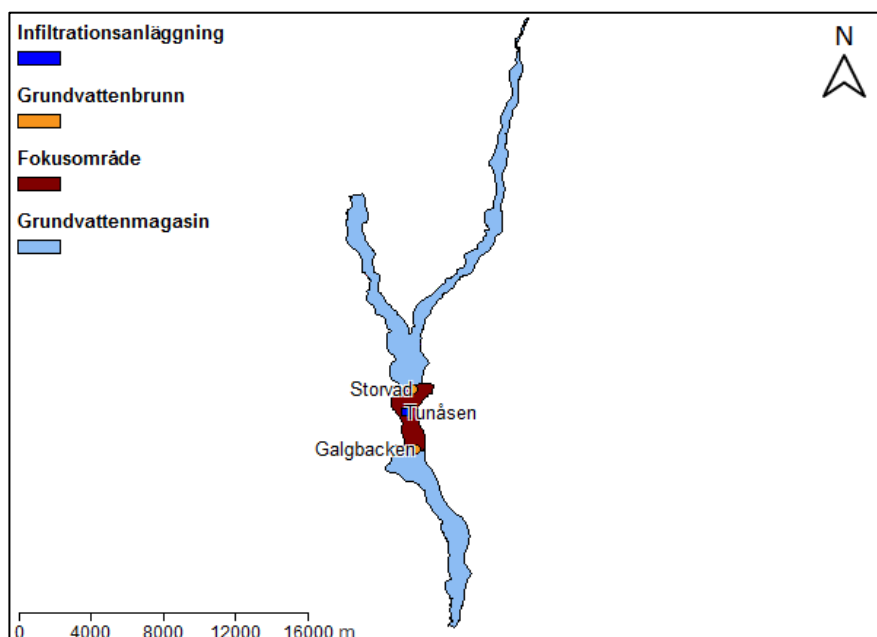
Den upprättade konceptuella modellen begränsades till området mellan grundvattentäkterna i Storvad och i Galgbacken.

Utanför ramarna för detta examensarbete simulerades utifrån sammanställd data och baserat på den framtagna konceptuella modellen en transporttid för fokusområdet. Detta gjordes av Jean-Marc Mayotte vid institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet. Då resultatet av dessa simuleringar är av intresse för analysen av variationen i den skattade hydrauliska konduktiviteten, redovisas simuleringsarbetet och dess resultat i korthet även i detta arbete.

## 2 TEORI OCH BAKGRUND

### 2.1 OMRÅDESBESKRIVNING

I Uppsala län hittas de två största grundvattenförekomsterna i länets två nord-sydliga rullstensåsar, Uppsalaåsen och Vattholmaåsen (Bergström, 1986; Norra Östersjöns Vattendistrikt, 2008). Dessa utgör tillsammans huvuddelen av Uppsala stads råvattentillgångar. Fokusområdet för detta arbete (figur 1) är beläget längs med Uppsalaåsen, vilken enligt Vatteninformationssystem Sverige (VISS) (2014) har ovanligt goda uttagsmöjligheter på i vissa fall mer än 125 l/s.

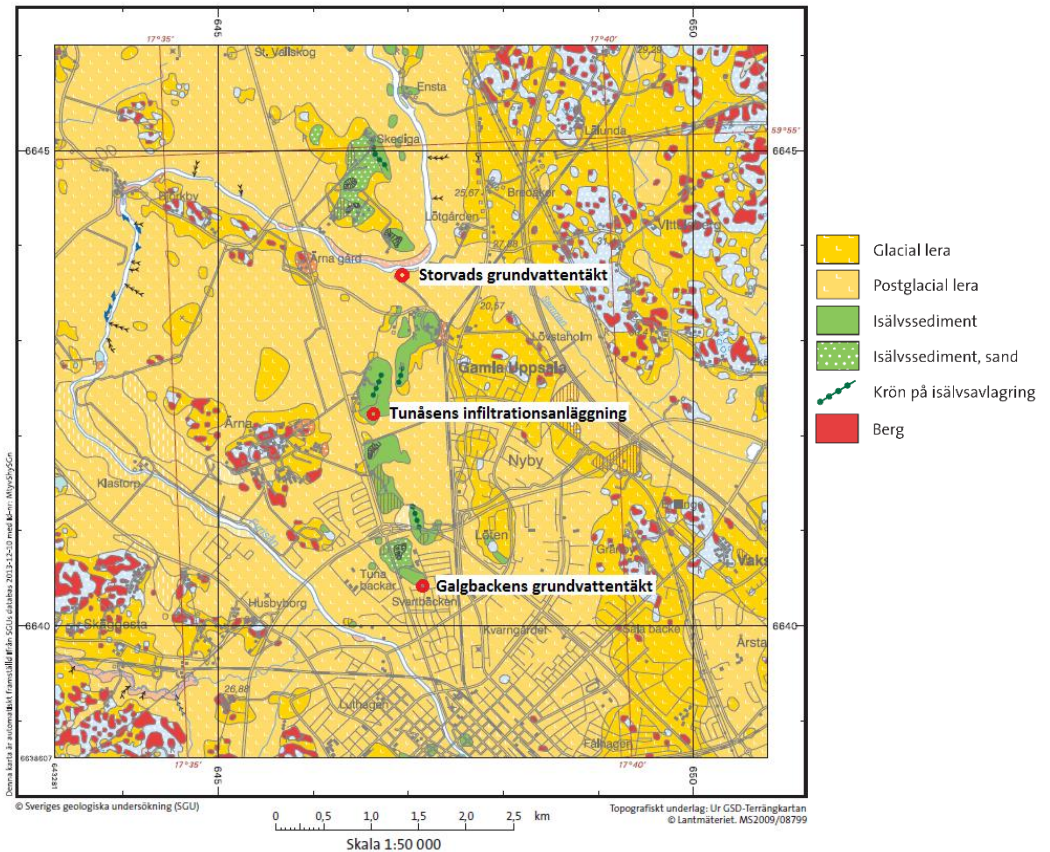


**Figur 1** Fokusområdets placering i förhållande till grundvattenmagasinet i Uppsalaåsen och Vattholmaåsen. Grundvattenmagasinets utsträckning från SGU (SGU, 2013c).

#### 2.1.1 Uppsalaåsen

Uppsalaåsen bildades under subakvatiska förhållanden när inlandsisen drog sig tillbaka för cirka 10 000 år sedan (Ahlgren, Bergström & Pousette, 1992). Den är av typen dränerande ås och sträcker sig nästan 250 km från Södertörn, genom Uppsala och ut i Gävlebukten (Nationalencyklopedin, 2013). Kring Uppsala är isälvs materialet avsatt på västra delen av den förkastning som löper under staden och åsen kan på vissa platser därför ha en mäktighet på uppemot 150 m (Ahlgren, Bergström & Pousette, 1992). I området precis norr om Uppsala är den till stor del överlagrad av lera, men kan ibland ses som uppstickande ryggar och kullar av grövre material (SGU, 2013a). Jordartskartan i figur 2 visar tydligt dessa ryggar och kullar av isälvs material markerade i grönt. Omkring kullarna ses den överlagrade leran i form av glacial och postglacial lera (markerat med gult med vita prickar). Till följd av de goda tillgångarna på grus har tidigare grustagsverksamhet i vissa områden haft stor inverkan på åsens utseende (Lundin, 1988).





**Figur 2** Jordartskarta över området mellan Storvads och Galgbackens grundvattentäkter samt fokusområdets huvudpunkter. Jordartskartan är framtagen med SGUs kartgenerator (SGU, 2013b).

### 2.1.2 Tunåsens infiltrationsanläggning

Tunåsens infiltrationsanläggning ligger på Uppsalaåsen, 2 km norr om Galgbackens grundvattentäkt och cirka 1,3 km söder om Storvads grundvattentäkt. Anläggningen togs i bruk 1966 och tar varje dygn hand om ca 16200 m<sup>3</sup> vatten, vilket fördelas på tio infiltrationsbassänger (Karin Wertsberg, personlig kommunikation, 2013-11-07). Det vatten som infiltreras tas från Fyrisån i höjd med Storvads grundvattentäkt och filtreras först i ett antal snabbfilter innan det pumpas upp till bassängerna på Tunåsen.

Maxkapaciteten för vad som var tillåtet att ta ut från åsen var på 50-talet 260 l/s (VBB, 1955). Då det förutspåddes att den då befintliga infrastrukturen skulle leda till att detta flöde uppnåddes redan 1964, togs beslutet att bygga en anläggning för konstgjord infiltration. Utifrån de infiltrationsplatser som utreddes ansågs Tunåsen vara den mest lämpliga, både med avseende på dess påverkan på grundvattennivån och på grund av att vattnet skulle hinna uppnå grundvattenkaraktär innan det togs upp vid Galgbackens grundvattentäkt (VBB, 1955, 1958). 1956 genomfördes därför en försöksinfiltration uppdelad på perioderna 20 januari-19 april och 25 juni-19 oktober med endast tre kortare uppehåll i den senare perioden. Resultatet av dessa visade att det infiltrerade vattnet till stor grad blev en del av det naturliga grundvattnet och stärkte därmed att Tunåsen var lämplig som infiltrationsplats.

### 2.1.3 Galgbackens grundvattentäkt

Galgbackens grundvattentäkt ligger i Svartbäcken i nära anslutning till Galgbackens vattenverk, vilket var i bruk perioden 1967-2006. Efter att Gränby vattenverk togs i bruk i februari 2007 används endast ca 90 l/s av det uppumpade vattnet till dricksvatten (Philip McCleaf, personlig kommunikation 2014-02-06). För att hålla grundvattennivån

på en jämn nivå pumpas dock en större mängd än detta upp. Det vatten som inte pumpas vidare till Gränby vattenverk leds till dagvattenledningar och vidare ut i Fyrisån.

#### 2.1.4 Storvads grundvattentäkt

Storvads grundvattentäkt togs i bruk 1972 och består av tolv grundvattenbrunnar, vilka varje dygn producerar i medeltal 19700 m<sup>3</sup> (Alexej Paptchikhine, personlig kommunikation, 2013-10-29). De vattenförande jordlagren i grundvattentäkten är överlagrade av mellan 23 och 27 m postglacial lera (Uppsala vatten och avfall AB, u.å:a). Från Storvad pumpas det upptagna vattnet till Gränby vattenverk för vidare behandling.

## 2.2 EN RULLSTENSÅS BILDNING

Rullstensåsar bildades under inlandsisens tillbakagång och står för en stor del av Sveriges grundvattentillgångar (Norra Östersjöns Vattendistrikt, 2008; SGU, 2009). Två huvudtyper av dessa rullstensåsar är subakvatiska åsar, vilka bildades under ytan på de smältvattenmassor som isen lämnade efter sig, samt supraakvatiska åsar, vilka bildades ovanför vattenytan (Benn & Evans, 2010).

I de subakvatiska avlagringarna avsattes till en början det material som ismassorna tagit upp på sin väg genom landskapet. Detta material avsattes direkt på berggrunden och bildade jordarten morän (Ahlgren, Bergström & Pousette, 1992). Vid avsmältningen skapades sedan isälvar, vilka eroderade ytan under isen och transporterade grus, sten och block ut till mynningen vid iskanten. När isälven nådde iskanten och havet av smältvatten sänktes hastigheten och suspenderat material avsattes i subakvatiska åsar (Benn & Evans, 2010). Finare material som silt och stora mängder lera kunde transporteras längre innan det avsattes i sänkor på havsbotten. Allt eftersom havsnivån sjönk eroderade vågorna åsryggarna och det fina materialet omlagrades längre ut på sidorna. Detta ledde till att grövre material i åsryggarna exponerades samt till att åsen fick en rundad form (Ahlgren, Bergström & Pousette, 1992).

Supraakvatiska åsar bildades till skillnad från subakvatiska åsar inte nödvändigtvis i isens avsmältningens riktning. Detta beror på att de inte endast bildades till följd av isälvar, utan även genom att smältvatten tog sig fram genom större sprickor (Benn & Evans, 2010). Eftersom de till följd av sin bildning oftast inte eroderats av vågor, har de varken omlagrats eller fått en lika rund form som subakvatiska åsar. De har ofta inte heller en lika tydlig lagerstruktur (Benn & Evans, 2010).

Utöver bildningstypen kan åsar även skiljas åt genom att de antingen är dränerande eller läckande (Benn & Evans, 2010). Dränerande åsar fungerar som namnet antyder genom att de dränerar grundvatten från intilliggande områden och berggrund. Läckande åsar förlorar istället vatten till omgivningen.

## 2.3 GRUNDLÄGGANDE BEGREPP

### 2.3.1 Darcys lag och hydraulisk potential

Grundvattenflödet,  $Q$ , beskrivs av Darcys lag, vilken utgår från den hydrauliska konduktiviteten,  $K$ , grundvattenflödets tvärsnittsarea,  $A$ , och den hydrauliska gradienten,  $\frac{dh}{dl}$ , enligt ekvation (1) (Hendriks, 2010).

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

där  $Q$  är grundvattenflödet [m<sup>3</sup>/s]  
 $K$  är den hydrauliska konduktiviteten [m/s]

$A$  är arean av det tvärsnitt grundvattenflödet går igenom [ $m^2$ ]  
 $\frac{dh}{dl}$  är den hydrauliska gradienten [ $m$ ]  
 $dh$  är skillnaden i hydraulisk potential mellan två punkter [ $m$ ]  
 $dl$  är sträckan mellan två punkter i grundvattenströmningens riktning [ $m$ ]

Det är till störst del den hydrauliska gradienten, det vill säga skillnaden i hydraulisk potential mellan två punkter, som styr grundvattenflödets riktning. Detta genom att grundvattenströmning sker från punkter med högre hydraulisk potential till punkter med lägre hydraulisk potential. Den hydrauliska potentialen är summan av tryckpotentialen,  $\Psi$ , och lägespotentialen,  $z$ , i en punkt enligt ekvation (2) (Domenico & Schwartz, 1998). För grundvatten i en öppen akvifer, det vill säga i en akvifer med fri grundvattenyta, motsvarar den hydrauliska potentialen grundvattenytans läge uttryckt i  $m$  (Hendriks, 2010).

$$h = \Psi + z \quad (2)$$

Utifrån den hydrauliska potentialen kan därefter den hydrauliska gradienten för endimensionell grundvattenströmning i horisontal led ( $x$ -led) beräknas med ekvation (3) (Hendriks, 2010).

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(\Psi_2 + z_2) - (\Psi_1 + z_1)}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

För flerdimensionell grundvattenströmning kan på samma sätt gradienterna  $\frac{dh}{dy}$  och  $\frac{dh}{dz}$  beräknas.

Även om den hydrauliska gradienten är styrande när det gäller grundvattenflödets riktning, visar Darcys lag att grundvattenflödets hastighet också påverkas av den hydrauliska konduktiviteten,  $K$ . Den hydrauliska konduktiviteten anger hur väl ett material leder vatten genom att ta hänsyn till både vätskans och mediets egenskaper enligt ekvation (4) (Domenico & Schwartz, 1998). Ofta används enheten  $m/s$  eller  $m/dygn$ .

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (4)$$

där  $k$  är mediets (jordmaterialets) permeabilitet [ $m^2$ ]  
 $\rho$  är vätskans densitet [ $kg/m^3$ ]  
 $\mu$  är vätskans viskositet [ $kg/(m \cdot s)$ ]  
 $g$  är gravitationen [ $m/s^2$ ]

Genom att dividera det totala grundvattenflödet,  $Q$ , med flödets tvärsnittsarea,  $A$ , erhålls det specifika flödet,  $q$ , enligt ekvation (5) (Hendriks, 2010). Det specifika flödet benämns ibland även Darcyhastighet.

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad (5)$$

där  $q$  är specifikt flöde (Darcyhastighet) [ $m/s$ ]

Om den hydrauliska konduktiviteten inte varierar med riktningen sägs mediet vara isotropt och  $K = K_x = K_y = K_z$ . I de fall där den hydrauliska konduktiviteten varierar

för olika riktningar sägs mediet vara anisotropt, vilket betyder att  $K_x \neq K_y \neq K_z$ . En generell form av Darcys lag för anisotropa medium ges i ekvation (6) (Domenico & Schwartz, 1998).

$$\vec{q} = -\bar{K}\nabla h \quad (6)$$

där  $\bar{K}$  är tensor för hydraulisk konduktivitet  
 $\nabla h$  är gradienten i hydraulisk potential

### 2.3.2 Integrerad hydraulisk konduktivitet i parallella jordlager

När en jord består av flera parallella lager med olika hydraulisk konduktivitet kan en integrerad hydraulisk konduktivitet för hela jorddjupet beräknas. Detta kan göras både för vatten som rör sig parallellt med jordlagren och för vatten som rör sig vinkelrätt mot lagren. Med avsikt att förenkla beräkningarna har i detta arbete endast den integrerade hydrauliska konduktiviteten parallellt med jordlagren, det vill säga i horisontellt led, beräknats. Till detta användes ekvation (7) (Hendriks, 2010):

$$K_{int,H} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i d_i}{d_{tot}} \quad (7)$$

där  $K_{int,H}$  är den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten för hela jorddjupet [m/s]  
 $K_i$  är den horisontella hydrauliska konduktiviteten i lager  $i$  [m/s]  
 $d_i$  är djupet av lager  $i$  [m]  
 $d_{tot}$  är det totala jorddjupet [m]

### 2.3.3 Vattenbalans

Grundvattenmodeller baseras till stor del på vattenbalansen i det undersökta området. I vattenbalansen specificeras inflöden och utflöden för området. Den grundläggande vattenbalansen är uppbyggd av nederbörd, evapotranspiration, avrinning samt magasinförändring enligt ekvation (8) (Knutsson & Morfeldt, 1993). Vänster sida av ekvationen specificerar inflöden och höger sida av ekvationen utflöden.

$$P = E + R + \Delta S \quad (8)$$

där  $P$  är nederbörd [mm/år]  
 $E$  är verklig evapotranspiration [mm/år]  
 $R$  är avrinning [mm/år]  
 $\Delta S$  är magasinförändring [mm/år]

För volymen av den mättade zonen i ett område där balans råder mellan in- och utflöden och där dessa flöden sker i form av konstgjord infiltration, grundvattenbildning och grundvattenuttag kan den grundläggande vattenbalansen utvecklas enligt ekvation (9). Grundvattenflöde förkortas i ekvation (9) till *grvflöde*. Termen  $Q_{grvattenbildning}$  baseras på det vatten som efter ett regn inte avgår genom evapotranspiration eller avrinning, eller som genom en förändring i markvattenhalten i den omättade zonen resulterar i en magasinförändring. Termerna  $Q_{grvflöde\ in}$  respektive  $Q_{grvflöde\ ut}$  avser det grundvatten som flödar in respektive ut ur volymen.

$$Q_{konstgjord\ infiltration} + Q_{grvbildning} + Q_{grvflöde\ in} = Q_{uttag} + Q_{grvflöde\ ut} \quad (9)$$

### **2.3.4 Grundvattenströmning i rullstensåsar**

Hur grundvattnet rör sig i en rullstensås är starkt kopplat till åsens morfologi, vilket betyder att grundvattenströmningen är beroende av åsens uppbyggnad. Då en rullstensås uppbyggnad i många fall är mycket komplex (Benn & Evans, 2010), är det inte ovanligt att grundvattenströmningen är detsamma. Komplexiteten härrör från rullstensåsarnas bildning, där förändringar i inlandsisens tunnelsystem kunde leda till att finare material återigen blev överlagrat av grövre material eller att en ny depositionssekvens påbörjades i en helt annan riktning (Benn & Evans, 2010). Till exempel kunde ett tunneltak kollapsa, med följden att vidare avlagring i tunneln blev omöjlig (Terwindt & Augustinus, 1985). Utöver detta rör det sig i många fall dessutom om stora materialmassor, såväl horisontellt som vertikalt, vilket leder till en utbredd komplexitet. Trots avlagringarnas mer eller mindre komplexa uppbyggnad är det ofta så att de på det stora hela bildar en kärna av sand-, grus- och stenlager (Sundlöf & Kronqvist, 1992). Det är i dessa genomsläppliga avlagringar som den största delen av grundvattenströmningen sker (SGU, 2009).

Det är dock inte bara mäktigheten hos de genomsläppliga lagren som är av betydelse för den totala grundvattenströmningen, utan den naturliga grundvattenbildningen är också av vikt. Naturlig grundvattenbildning sker där genomsläppligt material är beläget vid markytan, till exempel i form av blottlagt grus längs åsryggen. Den nederbörd som inte avdunstar infiltrerar genom markytan och förstärker grundvattenflödet. I de områden där grundvattenakviferen är slutet, det vill säga där den täcks av till exempel lågpermeabel lera, sker ingen direkt grundvattenbildning. För de åsar som är av dräneringstyp kan grundvattenflödet i åsen även förstärkas genom tillströmning av grundvatten från omkringliggande områden (Ahlgren, Bergström & Pousette, 1992). Det tillströmmande vattnet rör sig då under leran till dess att det når grundvattenflödet i åsen.

### **2.3.5 Jordartsindelning och jordartsbenämning**

Jordarter klassas antingen som organiska jordar eller som mineraljordar (Karlsson & Hansbo, 1984). Isälvssedimenten i rullstensåsar hör till de sistnämnda. Olika mineraljordar skiljs åt baserat på deras sammansättning, det vill säga baserat på vilka kornfraktioner de består av. Till en början görs en grov indelning baserat på kornstorlek i grupperna block och sten, grov jord och finjord (Karlsson & Hansbo, 1984). Därefter specificeras kornstorleken ytterligare genom att sex huvudgrupper med undergrupper används: block, sten, grus, sand, silt och ler. Kornstorleken för huvudgrupperna samt för deras respektive undergrupper ses i tabell 1.

**Tabell 1** Jordartsindelning hos mineraljordarter baserat på kornstorlek. Efter Karlsson och Hansbo (1984).

Huvudgrupp	Kornstorlek [mm]	Undergrupp	Kornstorlek [mm]
<i>Block- och sten</i>			
Block	>600	Grovblock	>2000
Sten	600-60	Grovsten	600-200
		Mellansten	200-60
<i>Grovjord</i>			
Grus	60-2	Grovgrus	60-20
		Mellangrus	20-6
		Fingrus	6-2
Sand	2-0,06	Grovsand	2-0,6
		Mellansand	0,6-0,2
		Finsand	0,2-0,06
<i>Finjord</i>			
Silt	0,06-0,002	Grovsilt	0,06-0,02
		Mellansilt	0,02-0,006
		Finsilt	0,006-0,002
Ler	<0,002	Finler	<0,0006

Kornstorleken avgörs för block och sten ofta direkt i fält, där de vanligtvis mäts (Karlsson & Hansbo, 1984). För grus och sand avgörs den genom siktning, vilket är en metod där jordprovet skakas genom nät med olika maskvidd. Det är därmed maskvidden hos sikten som anger kornfraktionens storlek. Kornstorleken hos finjordarna silt och ler avgörs genom att kornen tillåts sedimentera samtidigt som man mäter sedimenteringshastigheten (Karlsson & Hansbo, 1984).

Baserat på de ingående kornstorlekarna ges sedan jordarterna en benämning. Denna benämning utgår från den procentuellt ingående halten av olika kornfraktioner i jordprovet (tabell 2).

**Tabell 2** Riktlinjer för indelning av mineraljordar. Modifierad från Svenska geotekniska föreningen (Karlsson & Hansbo, 1984).

Kornfraktion	Vikt% av total jordmängd	Vikt% av grovjord + finjord	Vikt% ler i finjord	Tilläggsord	Huvudord
Block <sup>1</sup>	5-20			Blockig	
	>20			Mkt blockig	
Sten <sup>1</sup>	10-20			Stenig	
	>20			Mkt stenig	
Grus		20-40 <sup>2</sup>		Grusig	Grus
		>40			
Sand		20-40 <sup>2</sup>		Sandig	Sand
		>40			
Silt +ler, dvs finjord		15-40	<20	Siltig	
			≥20	Lerig	
		>40	<10		Silt
			10-20	Lerig	silt
			20-40	Siltig	lera
		>40	>40		lera

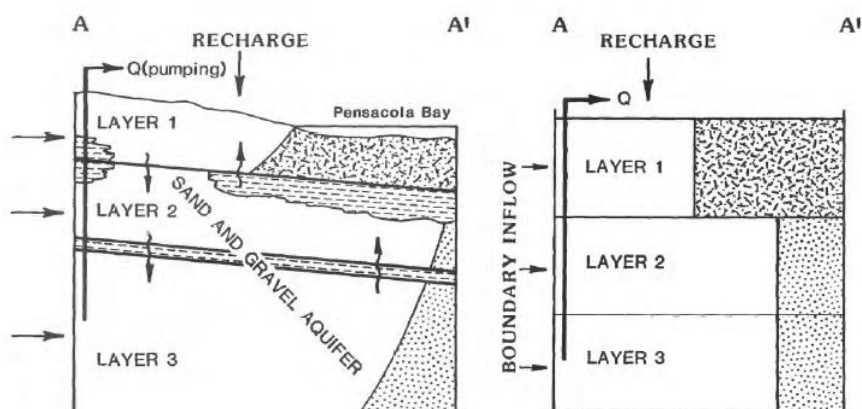
<sup>1)</sup> För >40 viktprocent används benämningen blockjord respektive stenjord.

<sup>2)</sup> Om både sand- och grusfraktionen ingår med >40 volymprocent anges den med störst ingående mängd som huvudord och den med mindre ingående mängd som tilläggsord. För morän är gränserna istället 25-50%.

I många fall består en jord dock inte endast av en kornfraktion. För att inkludera alla kornfraktioner av betydelse i benämningen används en metod där den huvudsakliga kornfraktionen står som substantiv, medan resterande står som tilläggsord i form av adjektiv (Karlsson & Hansbo, 1984). Betydelsen av de kornfraktioner som står som substantiv skiljs åt genom att ju längre bort från substantivet en kornfraktion står, desto mindre mängd ingår den med.

### 2.3.6 Konceptuell modell

Det första steget i grundvattenmodellering består av att formulera den frågeställning man avser besvara med hjälp av modellen. När frågeställningen är formulerad börjar arbetet med att skapa en konceptuell modell. I denna inkluderas och beskrivs de avgränsningar och förhållanden som är viktiga för att möjliggöra att frågeställningen besvaras. Detta görs genom att horisontella och vertikala randvillkor sätts upp, samt genom att vattenbalansen specificeras. Information till detta erhålls ofta från borrhål och geologisk data, samt från tillgänglig data över såväl grundvattenbildning som infiltration av ytvatten och uttag av grundvatten (Anderson & Woessner, 2002). Genom att ge en förenklad bild av de geologiska och hydrologiska egenskaperna hos området underlättas den matematiska modelleringen, vilken är den del av grundvattenmodelleringen där beräkningar och simuleringar görs. I figur 3 ges ett exempel på hur en vertikal konceptuell modell kan skapas utifrån ett vertikalt tvärsnitt och information om områdets vattenbalans.



**Figur 3** Exempel på en hur en konceptuell modell skapas utifrån ett geologiskt tvärsnitt och information om områdets vattenbalans. Från Franks, 1988.

### 3 METOD

Arbetet delades in i tre huvuddelar. Den första delen bestod av en litteraturstudie och en informationssammanställning, i vilken den idag tillgängliga informationen över borrhålsprofiler och mätdata i form av bland annat infiltrationsmängder, grundvattenuttag och grundvattennivåer sammanställdes. Den sammanställda informationen analyserades därefter noggrant med avseende på osäkerheter som kunde vara av betydelse i samband med skattningen av den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten och dennas variation. Med variation avsågs spannet mellan ett lägsta och ett högsta värde på den skattade hydrauliska konduktiviteten. Fokus för analysen lades på jordlagerdata, koordinater, grundvattenuttag, infiltrerad vattenmängd, grundvattenbildning och berggrundens läge. Då resultatet av analysen indikerade att flest osäkerheter kunde relateras till jordlagerdata, fokuserade nästa del av arbetet på att undersöka hur variationen påverkades av dessa.

I del två av arbetet undersöktes variationen i en skattad hydraulisk konduktivitet baserat på två typer av information: jordlagerbeskrivningar och siktanalyser. Detta gjordes genom att ett lägsta och ett högsta värde på hydraulisk konduktivitet skattades baserat på vardera informationstypen. Till följd av att en stor skillnad i den skattade variationen erhöles mellan dessa två informationstyper, utfördes även en enklare överslagsberäkning baserat på information om grundvattenföring och hydraulisk gradient. Detta gjordes för att uppskatta de två huvudberäkningarnas rimlighet. I överslagsberäkningen applicerades Darcys lag på fokusområdet.

Parallellt med informationsinsamlingen och beräkningarna utvecklades en konceptuell modell, till vilken de skattade värdena slutligen kopplades. Den konceptuella modellen skulle komma att användas som grund för en matematisk modell skapad av Jean-Marc Mayotte, i vilken enklare simuleringar av grundvattnets transporttid skulle utföras. Tanken med dessa simuleringar var att de skulle ge en indikation på hur variationen hos en skattad hydraulisk konduktivitet påverkar en simulerad transporttid.

#### 3.1 LITTERATURSTUDIE OCH INFORMATIONSSAMMANSTÄLLNING

En noggrann litteraturstudie och informationsinsamling genomfördes med målet att samla ihop så mycket information som möjligt om åsmaterialets sammansättning och om de rådande förhållandena i grundvattensystemet. Till följd av detta lades inte fokus på att söka efter en speciell typ av dokument, utan en ambition fanns istället om att sammanställningen skulle bli så täckande som möjligt. Att litteraturstudien och informationssamlingen utformades på detta sätt grundades på att det vid examensarbetets början inte fanns någon översiktlig sammanställning av vad som redan gjorts kring Uppsalaåsen i form av till exempel hydrogeologiska undersökningar. Det insamlade materialet skulle därmed inte endast fungera som underlag till beräkningarna i examensarbetet, utan också utgöra en viktig del i förarbetet inför Uppsala vattens kommande utveckling av den matematiska modellen.

Eftersökningar gjordes i Uppsala vattens dokumentarkiv, i deras kartarkiv, bland deras medarbetare samt i Uppsala stadsarkiv och SGUs brunnsarkiv. Utifrån de konsultrapporter, licentiatavhandlingar, kartor och andra relevanta dokument som hittades, sammanställdes information i form av såväl övergripande resultat som i form av enskilda borrhålsprofiler från tidigare utredningar. Till följd av examensarbetets avgränsningar var det i huvudsak material för Uppsalaåsen från Galgbacken och norrut som eftersöktes.



## **3.2 BEARBETNING AV INSAMLAD INFORMATION**

Genom litteraturstudien och informationssammanställningen erhölls en stor mängd analog jordlager- och kartdata samt en liten mängd digital data. Den analoga informationen bearbetades och digitaliserades genom att varje lagerföljd för de borrprofiler som hittats i maskinskrivna rapporter fördes in i ett Exceldokument. För att möjliggöra kommande beräkningar av den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten i olika jordlagerföljder, vilka alla innehöll många olika jordarter, var det nödvändigt att skilja de ingående kornfraktionerna åt. Detta gjordes genom att varje kornfraktion och textur indexerades. Även redan digitalt sammanställda borrprofiler från SGU bearbetades på samma sätt. De i lagerföljderna förekommande jordarterna grupperades sedan i de tre lager som skulle komma att användas i den konceptuella och den matematiska modellen som skulle utvecklas av Jean-Marc Mayotte. De funna kartorna scannades in och georefererades för att göra det möjligt att ta fram koordinater för de jordlagerföljder som ännu inte hade detta. Slutligen bearbetades tillgänglig mätdata för grundvattenuttag, infiltrationsmängder och grundvattenstånd.

### **3.2.1 Jordlagerföljder**

Utifrån det i litteraturstudien och informationssökningen insamlade materialet samt utifrån data från SGUs brunnsarkiv (SGU, 2013d), sammanställdes jordprofilsdata från 207 rekognosceringsborrningar, seismiska sonderingar och grundvattenbrunnar. Varje jordart som förekom i profilbeskrivningarna från antingen rekognosceringsborrningarna eller sonderingarna märktes utifrån ett klassificeringssystem med egenvalda materialindex. Syftet med detta var att särskilja de olika kornfraktionerna och texturerna åt inför den i Matlab kommande analysen av jordprofilerna. Till exempel gavs lera index 8 och grovt grus index 3. För att markera vart jordlagren slutade och berggrunden började gavs även berggrund ett index. Totalt användes 32 materialindex (se Bilaga A). Dessa inkluderade såväl kornfraktioner (till exempel sand), som texturer (till exempel sandig/sandigt). Inför analysen sorterades därefter jordarterna i varje lager från största till minsta ingående procentuella mängd enligt den idag gällande metoden för jordartsbenämning (se avsnitt 2.3.5). Utifrån detta placerades de ingående fraktionerna i någon av fyra kolumner, där kolumn 1 innehöll den fraktion som ingick med störst mängd och kolumn 4 den som ingick med minst mängd. För ett lager med moigt, sandigt grus med sten sorterades därmed grus (index 1) som mest förekommande i kolumn 1, sandigt (index 12) som näst mest förekommande i kolumn 2, moigt (index 19) som näst minst förekommande i kolumn 3 och sten (index 15) som minst förekommande i kolumn 4. I exemplet i tabell 3 på nästa sida ses detta lager som det översta i lagerföljden.

**Tabell 3** Ett utdrag ur sammanställningen över borrhållsdata som visar ett exempel på indexering av jordarter. Kolumnen markerad med 1 visar den huvudsakliga fraktionen, kolumn 2 den som är näst mest förekommande och så vidare. Siffrorna i kolumnerna 1-4 anger jordarternas index, t.ex. 1=grus, 12=sandigt, 19=moigt och 15=sten.

Borrhål	Övre gräns		Jordart	1	2	3	4
	för lager (m)						
5705	0		Moigt, sandigt grus med sten	1	12	19	15
5705	15		Grusig mellansand	6	13		
5705	17		Moigt, sandigt grus	1	12	19	
5705	20		Grovt grus med sten	3	15		
5705	34		Sandigt grus	1	12		
5705	37		Grovsand	7			
5705	39		Mellansand	6			
5705	39,7		Berggrund	9			

Utöver indexeringen redigerades även lagerföljderna i den mån det krävdes. Till exempel innehöll vissa lager *fyllning*, antingen efter att tidigare ha använts som lertåkt eller till följd av andra verksamheter. När fyllning förekom i lager med liten mäktighet (<1 m) approximerades de berörda lagren till den jordart som förekom i det närmast underliggande lagret. Om ett lager med fyllning uppgick till flera meter valdes borrhålet bort, då bedömningen gjordes att en inkludering av borrhålet skulle leda till alltför stora osäkerheter. Detta gjordes inte specifikt för detta arbete, då fyllningen till störst del förekom ovanför grundvattenytan. Istället gjordes det som en del av den genomgående sammanställning som är en del av Uppsala vattens kommande modellutveckling.

Ytterligare ett antal borrhål valdes bort på grund av att de hade lager som endast beskrevs med termen *do*. Detta eftersom betydelsen av termen trots närmare undersökningar vid den aktuella tidpunkten inte kunde fastställas. I de seismiska profiler som erhöles från SGUs brunnsarkiv uppskattades innebörden av benämningen *friktionsmaterial* utifrån lagerföljder gjorda för närliggande rekognosceringsborrningar. Benämningen *sten eller block* approximerades med berggrund. Även själva beskrivningen av ett fåtal lager i lagerföljder upprättade från 70-talet och framåt redigerades, då de till skillnad från resterande lager beskrivits utifrån en nyare kornstorleksskala och därför innehöll *silt* istället för *mo* och *mjäla* (Karlsson & Hansbo, 1984). För att genomgående använda samma beskrivningssätt gjordes därför följande anpassningar:

- Silt antogs vara finmo.
- Lerig silt och siltig lera antogs vara mjäla.

I tabell 4 kan denna anpassning ses i relation till resterande fraktioner enligt den idag gällande kornstorleksindelningen från Svenska geotekniska föreningen (Karlsson & Hansbo, 1984). Den ursprungliga indelningen anges i normal text och den anpassade i kursiv fetstil.

**Tabell 4** Riktlinjer för indelning av mineraljordar. Modifierad från Svenska geotekniska föreningen (Karlsson & Hansbo, 1984). Text i kursiv fetstil visar på anpassning av silt till ett äldre indelningssystem med mo och mjåla.

Kornfraktion	Vikt% av total jordmängd	Vikt% av grovjord + finjord	Vikt% ler i finjord	Tilläggsord	Huvudord
Block <sup>1</sup>	5-20			Blockig	
	>20			Mkt blockig	
Sten <sup>1</sup>	10-20			Stenig	
	>20			Mkt stenig	
Grus		20-40 <sup>2</sup>		Grusig	
		>40			Grus
Sand		20-40 <sup>2</sup>		Sandig	
		>40			Sand
Silt +ler, dvs finjord		15-40	<20	Siltig ( <i>moig/mjålig</i> )	
			≥20	Lerig	
		>40	<10		Silt ( <i>finmo</i> )
			10-20	Lerig	silt ( <i>mjåla</i> )
			20-40	Siltig	lera ( <i>mjåla</i> )
			>40		lera

<sup>1)</sup> För >40 viktprocent används benämningen blockjord respektive stenjord.

<sup>2)</sup> Om både sand- och grusfraktionen ingår med >40 volymprocent anges den med störst ingående mängd som huvudord och den med mindre ingående mängd som tilläggsord. För morån är gränserna istället 25-50%.

Anpassningen av silt till mo och mjåla följdes därefter av ytterligare tre anpassningar:

- Morån avlagrad på berggrund, det vill säga bottenmorån, approximerades med mjåla (Karlsson & Hansbo, 1984; VBB, 1955).
- Morån ej avlagrad på berggrund men ej heller avlagrad som ytmorån approximerades med finmo. Detta baserades på funna värden på hydraulisk konduktivitet för grusig morån (Fagerström & Wiesel, 1972, Grip & Rodhe, 1994).
- Mosand approximerades med finsand.

När all data var sammanställd och redigerad erhöles ett huvuddatablad med alla lagerföljder och dessas materialindex.

### 3.2.2 Förenkling av jordlagerföljder inför uppbyggnaden av den konceptuella modellen

Inför arbetet med uppbyggnaden av den konceptuella modellen och den förenklade matematiska modellen var det nödvändigt att bestämma hur många lager modellen skulle bestå av. Lagerföljderna delades in efter genomsläpplighet i tre lager: ett med jordarter med mycket låg genomsläpplighet, ett med genomsläppliga jordarter samt ett med berggrund. Att endast tre lager användes var för att begränsa komplexiteten hos den matematiska modellen.

I de fall lera förekom i det översta lagret i lagerföljden gavs den benämningen *överlagrande lera*. Denna antogs ha mycket låg genomsläpplighet och placerades därmed i lagerindex 1. Övriga jordarter och även djupare belägna lerförekomster placerades i lagerindex 2. Anledningen till att dessa lerförekomster längre ner i lagerföljden placerades i lagerindex 2 istället för i lagerindex 1 är för att de ansågs viktiga i skattningen av den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten. Berggrund utgjorde lagerindex 3. I tabell 5 ses grupperingen i sin helhet. Viktigt att notera är att dessa lagerindex skapades för att fungera på samma sätt som

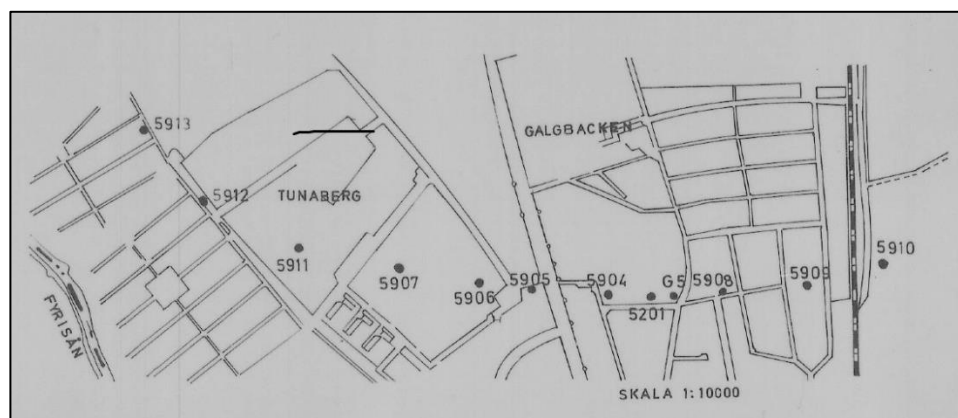
materialindexen, vilket betyder att alla lagerindex inte nödvändigtvis förekom i alla jordprofiler.

**Tabell 5** Gruppering av jordarter inför uppbyggnaden av Uppsalaåsens lagerföljd i en konceptuell modell och i en förenklad matematisk modell.

Lagerindex	Inkluderade jordarter
1	Överlagrande lera
2	Lerförekomster under markytan, mjåla, finmo, grusig morän, stenig morän, grus, fingrus, grovt grus, sand, finsand/grovmo, mellansand, grovsand, stenmaterial, sten, stenjord, blockjord, rullsten och bottenmorän
3	Berggrund, sten eller block, sten/block eller berg

### 3.2.3 Georeferering och framtagande av koordinater

Eftersom de flesta lagerföljdsutredningarna gjordes innan man började använda GPS, bestod en stor del av arbetet med bearbetningen av den insamlade informationen av att ta fram jordprofilernas position. Detta gjordes enligt koordinatsystemet SWEREF99 TM i programmet Saga GIS 2.1.0, där kända punkter på handritade kartor georefererades mot kända punkter på kartor erhållna från Lantmäteriet. Ett exempel på en handritad karta över Galgbacken ses i figur 4. Lantmäteriets tätortskarta, mot vilken den handritade kartan över Galgbacken georefererades, ses i figur 5. Koordinatsystemet SWEREF99 TM valdes till följd av att det tidigt i arbetet var osäkert vilket system merparten av den funna informationen var i. De koordinater som inte var i SWEREF99 TM transformerades med hjälp av Lantmäteriets koordinattransformator (Lantmäteriet, 2013) eller i Saga GIS.

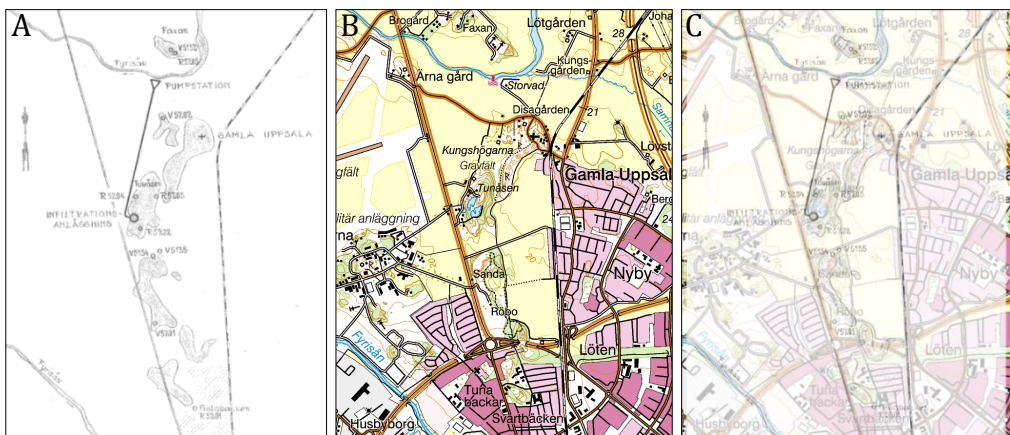


**Figur 4** Ritad karta över rekognosceringsbormingar utförda kring Galgbacken. Karta från Uppsala vattens ritningsarkiv.



**Figur 5** Den del av Lantmäteriets tätortskarta som den ritade kartan i figur 4 georefererades mot. ©Lantmäteriet i2012/921.

I vissa fall fanns det inte tillräckligt många tydliga punkter att tillgå på de ritade kartorna. Dessa anpassades då manuellt till en lämplig karta från Lantmäteriet med hjälp av programmet Adobe Photoshop (figur 6). Därefter georefererades punkter på den sammansatta kartan mot motsvarande punkter på kartan från Lantmäteriet.



**Figur 6** A. Ritad karta över området mellan Faxan och Galgbacken (VBB, 1955).  
 B. Lantmäteriets terrängkarta. ©Lantmäteriet i2012/921.  
 C. Den ritade kartan anpassad till terrängkartan i Adobe Photoshop.

För att undvika att ett eventuellt fel i framtagna koordinater fördes vidare och förstörades, användes inga av de i detta arbete framtagna koordinaterna som kända punkter i georefereringen av en annan karta. I de fall koordinater redan fanns att tillgå från SGU (2013b) eller från tidigare sammanställningar gjorda av Uppsala vatten, användes dessa som referenspunkter i den utsträckning det var nödvändigt. Utförliga anteckningar kring georefereringen hittas i Bilaga B.

### 3.2.4 Grundvattenuttag, infiltrationsmängd och grundvattennivåer

För att bland annat kunna specificera vattenbalansen i den konceptuella modellen, var det nödvändigt att samla in mätdata över grundvattenuttag, infiltrationsmängd och grundvattennivåer. De i detta avsnitt beskrivna data kommer från punkter där Uppsala vatten i nuläget driver en anläggning alternativt utför grundvattennivåmätningar. Inför insamlandet av mätdata delades åsen upp i tre områden:

- 1) Uppsalaåsen och Vattholmaåsen från Storvads grundvattentäkt och norrut till Lövstalöt respektive Vattholma
- 2) fokusområdet mellan Storvads grundvattentäkt och Galgbackens grundvattentäkt
- 3) Uppsalaåsen precis söder om Galgbackens vattentäkt

Denna uppdelning gjordes för att möjliggöra en beskrivning av vattenbalansen för fokusområdet, där den mängd vatten som tillfördes området från åsens norra delar behövde vara känd. Utöver detta var det nödvändigt att kunna ange modellens södra gräns med hjälp av grundvattennivåer som inte var direkt påverkade av grundvattenuttag. För område 1 och 2 krävdes därmed information om såväl grundvattenuttag och infiltrationsmängder som grundvattennivåer, medan det för område 3 endast krävdes information om grundvattennivåer (tabell 6).

**Tabell 6** Insamlade mätserier för de tre åsområdena 1) norr om Storvads grundvattentäkt, 2) fokusområdet, 3) söder om Galgbackens grundvattentäkt.

Område	Mätserier
1	Grundvattenuttag, infiltrationsmängder, grundvattennivåer
2	Grundvattenuttag, infiltrationsmängder, grundvattennivåer
3	Grundvattennivåer

Mätserier med dygnsvärden för grundvattenuttag togs därefter fram för de sju punkter där grundvattenuttag sker i området mellan Lövstalöt och Vattholma i norr och Galgbacken i söder. Dessa punkter var Vattholma, Salsta, Kull-Gränby, Östa, Lövstalöt, Storvad och Galgbackens vattentäkter. För Storvad användes summan av uttagen i de tolv brunnarna och för Galgbacken summan av de brunnar som varje dag är i drift.

Konstgjord infiltration sker inom område 1 och 2 på de fyra platserna Husby, Lövstalöt, Stora Vallskog och Tunåsen. Till följd av oregelbunden drift i Husbys infiltration togs endast mätserier med dygnsvärden för de övriga tre fram.

Information om grundvattennivåer erhöles för fem punkter med automatisk nivåmätning samt tio punkter där manuella mätningar sker. I alla dessa punkter sker mätning i dagsläget. De automatiska mätserierna erhöles för punkterna LM20 och LM21 i Storvad, LM90 i Tunåsen, LM120 i Galgbacken och LM190 i Stadsträdgården. I dessa serier saknades endast ett fåtal värden. För att ersätta dessa beräknades ett medelvärde baserat på dagen före och dagen efter det saknade värdet. Data från manuella mätningar fanns för tre punkter vid Vattholma-Skyttorp, två punkter i Kull-Gränby, en punkt i Östa, tre punkter i Lövstalöt, samt för en punkt i Husby. Dessa erhöles i form av ett värde per månad. Till följd av att olika lokala höjdsystem används i olika områden i och runt Uppsala innan Uppsala kommun 2006 övergick till RH2000, korrigerades fixpunkterna som de framtagna manuella mätserierna baserades på med mellan 0,225 m och 0,67 m och de automatiska mätserierna med 0,225 m (Uppsala kommun, 2005) (tabell 7).

**Tabell 7** Korringeringsvärden använda vid konvertering från lokala höjdsystem till RH2000.

Område	Ursprungligt höjdsystem	Korrigerat med (m)
Galbacken	Uppsala lokala	+0,225
Lövstalöt	RH00 (Björklinge-Bälinge)	+0,65
Stadsträdgården	Uppsala lokala	+0,225
Storvad	Uppsala lokala	+0,225
Storvreta	Uppsala lokala	+0,225
Tunåsen	Uppsala lokala	+0,225
Vattholma	RH00 (Vattholma-Skyttorp)	+0,67

### 3.3 OSÄKERHETER I INDATA

För att kartlägga osäkerheterna relaterade till befintlig information, dokumenterades och analyserades information kring berggrundens och markytans läge, kring de framtagna koordinaterna och kring värden på grundvattenbildning, infiltrationsmängd, uttagsmängd och grundvattennivåer. Analysen skedde med fokus på såväl insamlingen av data som med fokus på hur de till den konceptuella modellen utvalda parametervärdena kunde påverka variationen i en skattat integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet. Även information i de funna borrprofilerna, såsom kornstorleksfördelning och beskrivningssätt, utvärderades och dokumenterades. Kornstorleksfördelningens och beskrivningssättets påverkan på variationer i skattningen av den integrerad hydrauliska konduktiviteten utreddes noggrant genom att ett lägsta och ett högsta värde beräknades både baserat på jordarters beskrivningssätt och på information från siktanalyser. De beräknade värdena jämfördes därefter genom att en överslagsberäkning på hydraulisk konduktivitet utfördes för fokusområdet. Denna beräkning gjordes med Darcys lag och baserades således bland annat på information om grundvattenföring och på information om den hydrauliska gradienten.

#### 3.3.1 Dokumentering av osäkerheter

Dokumentering och analys av information kring berggrundens och markytans läge, kring grundvattenbildning, infiltrerad vattenmängd, uttagsmängd och grundvattennivåer samt kring de framtagna koordinaterna och erhållna jordlagerdata skedde i den mån det var möjligt för hela området norr om Stadsträdgårdens grundvattentäkt. Fokus lades på att analysera hur data samlats in samt på att analysera de från det insamlade underlaget utvalda parametervärdena.

För erhållna jordlagerdata analyserades använda kornstorleksskalor, beskrivningssätt, kornstorleksfördelning och vilken undersökningsmetod som använts vid upprättande av lagerföljderna. Utredningen kring kornstorleksfördelningen beskrivs separat i avsnitt 3.3.2.

Analysen av koordinater rörde främst hur de tagits fram. Osäkerheter kring berggrundens och markytans läge dokumenterades. Berggrundens läge utvärderades i såväl vertikalled som i nord-sydlig riktning. Slutligen gjordes en kvalitativ utvärdering av den framtagna informationen kring grundvattenbildning, infiltrerade mängder, uttagna mängder och grundvattennivåer.

#### 3.3.2 Undersökning av jordlagrens kornstorleksfördelning

En undersökning av kornstorleksfördelningen i de olika jordlagren gjordes för att få en uppskattning om hur stor variation de använda lagerbeskrivningarna kunde resultera i. Analysen gjordes för varje lager i varje lagerföljd. På grund av den stora mängden data automatiserades analysen genom att ett program skrevs i Matlab (Bilaga G). Utifrån huvuddatabladet lästes varje jordlager i varje lagerföljd av varpå de ingående

jordarterna eller enskilda fraktionerna tilldelades en undre och en övre kornstorleksgräns. Underlaget till dessa gränser utgjordes av en kombination av den kornstorleksfördelning som användes på 50-, 60- och 70-talet och den idag använda skalan från Svenska geotekniska föreningen (SGF). Då ingen referens fanns till vilken skala som använts vid upprättandet av majoriteten av lagerföljderna, togs beslutet att i arbetet använda såväl Ekströms skala från 1927 som Jordartskommitténs från 1953, vilka endast skiljer sig marginellt från varandra (Karlsson & Hansbo, 1984) (figur 7).

0,0006 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 200 600 2000 mm														
SGFs LABORATORIEKOMMITTÉ, 1981*														
Ler			Silt			Sand			Grus			Sten		Block
Fin- ler	Fin- silt	Mellan- silt	Grov- silt	Fin- sand	Mellan- sand	Grov- sand	Fin- grus	Mellan- grus	Grov- grus	Mellan- sten	Grov- sten	Grov- block		
JORDARTSKOMMITTÉN, 1953														
Ler		Mjåla		Mo		Sand		Grus		Sten		Block		
Fin- mjåla	Grov- mjåla	Finmo	Grovmo	Mellan- sand	Grov- sand	Fin- grus	Grov- grus							
EKSTROM, 1927														
Ler		Mjåla		Mo		Sand		Grus		Sten		Block		
Fin- mjåla	Grov- mjåla	Finmo	Grovmo	Mellan- sand	Grov- sand	Fin- grus	Grov- grus	Mindre sten	Större sten					

**Figur 7** Exempel på tre kornstorleksskalor som kunde ligga till grund för jordartsbestämningen under 50-, 60-, och 70-talet. Kornstorleksindelningen i dessa användes som underlag för att specificera undre och övre kornstorleksgräns för de i jordartsbeskrivningarna ingående fraktionerna. Modifierad från Karlsson och Hansbo (1984).

Anledningen till att information från flera olika skalor användes var främst på grund av att jordlagerbeskrivningarna gjorts under skilda tidsperioder. Dessutom möjliggjorde en kombination av de olika skalorna en mer korrekt anpassad kornstorleksangivning. Till exempel förekom grovt grus endast i beskrivningar från 50-talet, vilket gjorde att dess kornstorleksintervall därför baserades på de äldre kartorna. Detta resulterade i att intervallet blev 6-20 mm istället för det enligt SGFs indelning 20-60 mm. Dessutom förekom jordarten finsand i beskrivningar från 50-talet, trots att denna benämning inte fanns i någon av de äldre skalor som hittats. Genom att jämföra de äldre skalorna med SGFs skala var det möjligt att bestämma kornstorleken för finsand till intervallet 0,06-0,2 mm. En komplett redogörelse för de kornstorleksfördelningar som användes ges i tabell 8.

**Tabell 8** Värderna på använd övre och undre kornstorleksgräns för de olika kornfraktionerna.

Kornfraktion	Undre gräns (mm)	Övre gräns (mm)
Lera	0	0,002
Mjåla	0,002	0,02
Mo	0,02	0,06
Finsand	0,06	0,2
Mellansand	0,2	0,6
Grovsand	0,6	2
Sand	0,06	2
Fingrus	2	6
Grovt grus	6	20
Grus	2	20
Sten	20	200
Block	200	2000



### **3.4 SKATTNING AV INTEGRERAD HORISONTELL HYDRAULISK KONDUKTIVITET**

En förutsättning för att undersöka hur variationen i den hydrauliska konduktiviteten påverkar en beräknad transporttid är att det finns värden på just hydraulisk konduktivitet. Dessa värden kan komma från experiment gjorda i fält eller i laboratorium, eller vara typvärden. Eftersom inga värden på den verkliga hydrauliska konduktiviteten fanns att tillgå, sammanställdes litteraturvärden från nio källor av varierande typ och relevans. Då de från litteraturen erhållna värdena för en och samma jordart kunde skilja sig flera tiopotenser, ansågs det nödvändigt att utföra beräkningar som var mer anpassade till de sammanställda jordlagerföljderna och till fokusområdet. Genom dessa beräkningar erhöles ett högsta och lägsta värde på integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för varje jordlagerföljd och för scenarion där olika jordfraktioner utgjorde grunden. Skattningar utfördes baserat på lagerföljdsbeskrivningarna och på siktanalyser. De beräknade värdena jämfördes sedan med värden erhållna genom en överslagsberäkning baserad på grundvattenföring och hydraulisk gradient.

#### **3.4.1 Rimlighetsanalys av olika jordarters hydrauliska konduktivitet**

23 värden på hydraulisk konduktivitet sammanställdes från nio källor. Då de funna värdena i vissa fall skiljde sig åt markant för en och samma jordart, krävdes det att värdena utvärderades innan ett intervall som var kopplat till lägst osäkerhet kunde väljas. Utvärderingen gjordes genom att följande fem frågor besvarades för vart och ett av de sammanställda värdena:

- 1) Hur generaliserad är informationen?
- 2) Vilken typ av källa kommer informationen ifrån?
- 3) Är informationen baserad på mätningar och i så fall vilken typ och hur många?
- 4) Är informationen baserad på en modell och i så fall vilken typ av modell?
- 5) Hur lång är den tidsperiod som informationen baseras på?

Genom att alla värden utvärderades utifrån samma frågeställningar antogs det möjligt att jämföra rimligheten hos dessa och välja det värde som innehöll minst osäkerhet. De fem frågorna kopplades till svarsalternativ, vilka gav mellan ett och åtta poäng. Svar som ansågs visa på låg osäkerhet gav högre poäng än svar som ansågs visa på högre osäkerhet. Poängen från de olika frågorna summerades och utifrån summan gavs varje värde ett säkerhetsindex enligt skalan 1-5, där 5 motsvarade lägst osäkerhet. Index 1 gavs för en summa på 0-20% av totalpoängen, index 2 för 21-40% av totalpoängen och så vidare. En femgradig skala valdes för att värden som varken var kopplade till hög eller till låg osäkerhet skulle kunna ges indexet 3. Det värde som genom denna rimlighetsanalys erhöles högst säkerhetsindex var det värde som ansågs vara mest rimligt och som därmed valdes till det fortsatta arbetet. Om flera värden fick samma säkerhetsindex slogs intervallen samman. Svaren på de fem utvärderingsfrågorna kan ses i Bilaga C. Då inget värde kunde hittas för grovt grus, uppskattades detta som skillnaden i hydraulisk konduktivitet mellan grus och fingrus. Eftersom det därmed endast fanns ett intervall för grovt grus, inkluderades detta inte i utvärderingen.

#### **3.4.2 Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på lagerföljdsbeskrivningar**

Genom att beräkna en hydraulisk konduktivitet utifrån den information som ges i lagerföljderna var det möjligt att uppskatta ett största och minsta värde på en lagerföljds förmåga att släppa igenom vatten. Till detta användes de i avsnitt 3.4.1 fastställda

värdena på hydraulisk konduktivitet. Eftersom varje jordprofil delats in i mellan ett och tre lager, räckte det dock inte att veta den hydrauliska konduktiviteten för en enskild jordart eller ett enskilt lager. Istället krävdes det att den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten beräknades, det vill säga den hydrauliska konduktiviteten i horisontellt led baserad på alla lager i lagerföljden. Eftersom det endast var av intresse att beräkna den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten för de genomsläppliga jordlagren i varje profil (vilka tidigare fått lagerindex 2) krävdes först viss redigering av huvuddatabladet. Denna redigering bestod av att lager som bestod av överlagrande lera togs bort från databladet. Den lera som förekom längre ner i lagerföljden och som tidigare även inkluderats i lagerindex 2 behölls.

Efter att huvuddatabladet var redigerat kunde beräkningen av den resulterade hydrauliska konduktiviteten påbörjas. Beräkningen utfördes med ekvation (7) och för alla tillgängliga jordprofiler norr om Stadsträdgårdens grundvattentäkt. På grund av den stora mängden insamlad information automatiserades beräkningarna. Detta gjordes genom en utveckling av det Matlabprogram som tidigare skrivits för att undersöka kornstorleksfördelningarna i lagerföljderna (programmet finns i sin helhet i Bilaga G). Genom att det redigerade huvuddatabladet lästes av i Matlabprogrammet, skapades nya undre och övre gränser för de ingående kornfraktionerna. Till gränserna kopplades därefter de värden på hydraulisk konduktivitet som valts utifrån rimlighetsanalysen.

Det är oftast den finaste kornfraktionen som styr en jordarts vattengenomsläppande förmåga. För att få en uppfattning om variationen hos den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten,  $K_{int,H}$ , vid olika upplösning på indata gjordes dock beräkningar för varje jordprofil och för följande fyra scenarion:

- 1) alla ingående kornfraktioner påverkar  $K_{int,H}$
- 2) endast den procentuellt största kornfraktionen påverkar  $K_{int,H}$
- 3) endast den finaste kornfraktionen påverkar  $K_{int,H}$
- 4) endast den grövsta kornfraktionen påverkar  $K_{int,H}$ .

Om ett lager endast innehöll en jordart baserades alla fyra scenarion på denna.

Viktigt är att notera är att den metod som användes utgick från förenklingen att en jordart endast innehåller en kornfraktion. Därmed togs ingen hänsyn till eventuell inblandning av stenar eller block i fingrus, eller av fint material i block- eller stenjord. Med andra ord gjordes antagandet att fingrus endast består av fingrus och block- eller stenjord endast består av block respektive sten. Ett antagande som följde av denna förenkling var att sten, block, rullsten, stenjord och blockjord sattes att alltid ha en hydraulisk konduktivitet på 1 m/s. Detta eftersom ingen övre gräns för dessa material kunde hittas och där 1 m/s är den från rimlighetsanalysen valda övre gränsen för grus (se avsnitt 4.4.1).

### **3.4.3 Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på siktanalyser**

Vid skattningen i avsnitt 3.4.2 erhöles ibland en skillnad på uppemot åtta tiopotenser mellan största och minsta värde på den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten för en och samma lagerföljd. För att komplettera detta resultat beräknades därför även en hydraulisk konduktivitet utifrån den information som erhållits från siktanalyser gjorda på det material som tagits upp i samband med borrhningar. Av de sammanställda jordprofilerna fanns det siktcurvor upprättade för 28 lagerföljder från borrhningar utförda under 1952 och 1959.

Beräkningarna utfördes enligt Hazens formel (ekvation (10)), vilken baseras på information om de kornstorlekar som för varje jordprov kopplas till när tio ( $d_{10}$ ) respektive 60 ( $d_{60}$ ) viktprocent av provet tagit sig igenom sikten. Valet av formel

baserades på att värdena på effektiv kornstorlek ( $d_{10}$ ) samt värdena på graderingstalet  $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  höll sig inom de givna ramarna  $0,1 < d_{10} < 3,0$  mm respektive  $U < 5$  (Odong, 2008).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 6 \cdot 10^{-4} [1 + 10(n - 0,26)] d_{10}^2 \quad (10)$$

där  $g$  är gravitationen ( $9,31 \text{ m/s}^2$ )  
 $\nu$  är kinematisk viskositet. För vatten vid  $20^\circ$ :  $1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $n$  är porositeten, vilken ges av  $n = 0,225(1 + 0,83^U)$   
 $d_{10}$  är effektiv kornstorlek, vilken ges av maskvidden hos den sikt där 10 viktprocent av materialet kan passera (Larsson, 2008)

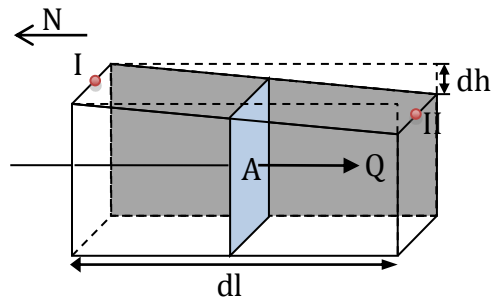
Genom ekvation (10) erhöles ett värde på hydraulisk konduktivitet för vart och ett av de lager i varje lagerföljd som uppfyllde de två kriterierna på  $d_{10}$  och  $U$ . De lager som inte uppfyllde dessa exkluderades från beräkningarna. Därefter användes ekvation (7) för att beräkna en integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet.

#### 3.4.4 Överslagsberäkning av hydraulisk konduktivitet baserad på grundvattenföring och hydraulisk gradient

Till följd av att skattningarna baserade på jordlagerföljder och siktkurvor resulterade i mycket skilda intervall, utfördes även en överslagsberäkning för att jämföra rimligheten i de skattade värdena. Överslagsberäkningen baserades på Darcys lag, vilken genom att ta hänsyn till grundvattenföring, grundvattenuttag, infiltrationsmängder, grundvattennivåer samt den tvärsnittsarea som grundvattnet passerar igenom ger en översiktlig uppfattning om åsens genomsläpplighet.

Beräkningarna baserades på en generaliserad uppbyggnad av åsen, i vilken den del som ingick i fokusområdet approximerades med en kanal med täta sidor mot såväl öst som mot väst (figur 8). Start- och slutpunkten för varje beräkning anges av I respektive II. Sträckan mellan punkt I och punkt II betecknas  $dl$  och skillnaden i grundvattennivå  $dh$ . Grundvattenflödet genom åsens uppskattade area,  $A$ , betecknas  $Q$  och är summan av de in- och utflöden som sker till och från den i form av kanalen avgränsade volymen. De inflöden som i beräkningarna togs i beaktande var naturlig grundvattenbildning och eventuell konstgjord infiltration inom fokusområdet. Då större delen av fokusområdet täcks av ett lager av lera, beräknades det tillflöde som sker genom grundvattenbildning endast för den delen av grundvattenmagasinet som ligger norr om Storvads vattentäkt. Den naturliga grundvattenbildningen beräknades för detta område till  $14750 \text{ m}^3/\text{dygn}$ . Utflöden gavs av såväl grundvattenuttagen i Storvad och Galgbacken, som av den grundvattenvolym som lämnar fokusområdet i sydligt riktning. Det södergående flödet beräknades genom den för området uppställda vattenbalansen:

$$Q_{\text{norrifrån}} + Q_{\text{infiltration}} - Q_{\text{uttag}} = Q_{\text{söderut}}$$



**Figur 8** Beskrivning av den schematiska uppbyggnad av åsen som användes i beräkningarna av hydraulisk konduktivitet utifrån Darcys lag.

Tvärsnittsarean,  $A$ , beräknades för mitten på fokusområdet. Dess höjd uppskattades utifrån skillnaden mellan berggrundens och grundvattenytans läge, vilket uppgick till 20,2 m. Tvärsnittsareans bredd uppskattades därefter genom mätningar gjorda i Saga GIS till 892 m.

Totalt genomfördes beräkningar för tolv olika sträckor inom fokusområdet (tabell 9). Dessa konstruerades utifrån sex startpunkter och fyra slutpunkter. Startpunkterna valdes utifrån tillgängliga mätdata till att möjliggöra beräkningar över såväl liknande, lite kortare, sträckor mellan Tunåsen och Galgbacken som till att möjliggöra en beräkning över hela fokusområdets sträckning. Slutpunkterna utgörs av observationsrör som valdes utifrån att det skulle vara möjligt att beräkna den hydrauliska konduktiviteten baserat både på grundvattendata påverkad av grundvattenuttag och på grundvattendata som sannolikt inte var påverkad till lika stor grad. Att göra detta var av intresse, då uttagsbrunnar kan påverka den närmast omkringliggande grundvattenytans utseende så pass mycket att en uppskattad hydraulisk gradient över sträckan inte blir representativ (Hendriks, 2010). En jämförelse mellan påverkade data och de som ansågs mindre påverkade gjordes därför också för att undersöka hur stor en eventuell skillnad var.

Data från år 1956, 1957, 1974 och 2010-2013 användes i beräkningarna (tabell 9). Valet av dessa år baserades på att de representerade perioder med olika vattenbalanser. År 1956 utfördes försöksinfiltrationen i Tunåsen och det enda uttaget skedde i Galgbackens grundvattentäkt. 1957 utfördes ingen infiltration i Tunåsen och uttag skedde fortsatt endast vid Galgbacken. 1974 skedde infiltration i Tunåsen och uttag i både Storvads och Galgbackens grundvattentäkter. Dessvärre visade det sig att manuella mätningar för observationsrören 5201 och Galgbacken saknades från mitten av 1967 och framåt, vilket ledde till att endast två beräkningar kunde utföras för 1974. Perioden 2010-2013 ansågs representativ för de infiltrations- och uttagsförhållanden som finns idag.

**Tabell 9** Översikt över de sträckor för vilka beräkningar gjordes utifrån Darcys lag.

Startpunkt	Slutpunkt	1956	1957	1974	2010-2013
Tunåsen	Galgbacken	x			
5202	5201	x	x		
	Galgbacken	x	x		
5203	35		x	x	
	5201	x	x		
	Galgbacken	x	x		
5205	35		x	x	
	5201	x	x		
	Galgbacken	x	x		
35	5201		x		
	Galgbacken		x		
LM21	LM120				x

### 3.5 UTVECKLING AV EN KONCEPTUELL MODELL

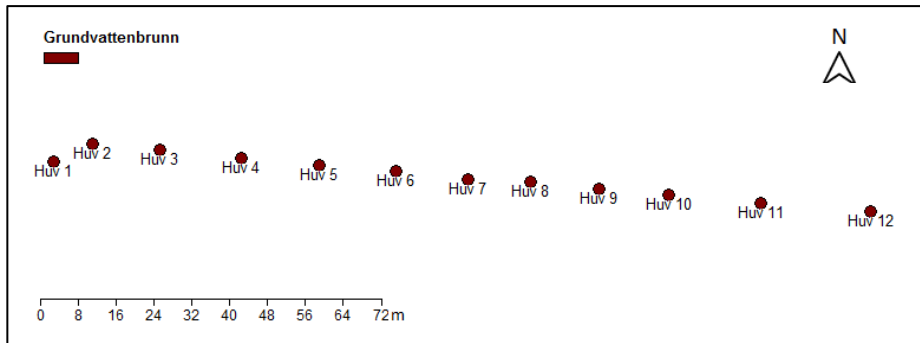
De i fokusområdet ingående processerna och förhållandena beskrevs genom att områdets avgränsningar först definierades. Utifrån områdets vattenbalans specificeras därefter de ingående faktorerna grundvattenuttag, konstgjord infiltration, naturlig grundvattenbildning och kända grundvattennivåer. Slutligen kopplades värden på hydraulisk konduktivitet till vart och ett av de tre lagren, där intervallet för det genomsläppliga lagret bestämdes utifrån de utförda beräkningarna.

#### 3.5.1 Avgränsningar, randvillkor och vattenbalans

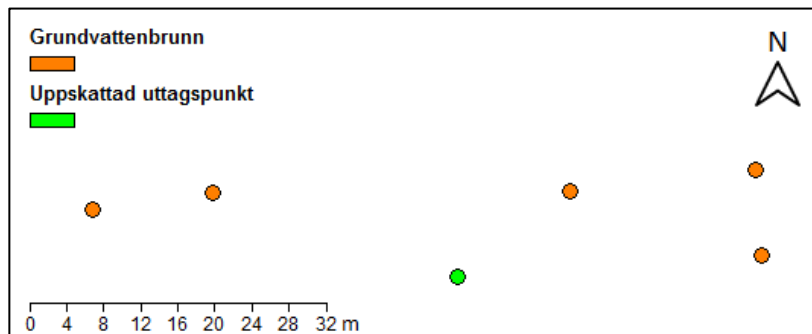
Den konceptuella modellen upprättades över fokusområdet och begränsades därmed av Storvads grundvattentäkt i norr och Galgbackens grundvattentäkt i söder. Modellen avgränsades utöver detta så väl i östlig-västlig riktning som i vertikalt led. När de yttre gränserna var fastställda utvecklades vattenbalansen för det avgränsade området. I denna specificerades de punkter och områden där vattenflöden rörde sig in i respektive ut ur den fastställda volymen.

#### 3.5.2 Grundvattenuttag

I området som specificerades för den konceptuella modellen sker större grundvattenuttag endast i Storvads och Galgbackens grundvattentäkter. Då Storvads grundvattentäkt består av tolv brunnar, approximerades det totala uttaget till att komma från brunnen i grundvattenhuv 7 (figur 9). Detta gjordes för att reducera modellens komplexitet. I Galgbackens grundvattentäkt är det i dag som mest två brunnar i drift. Det totala uttaget uppskattades till att komma från den grundvattenbrunn som är belägen i mitten av brunnsområdet (figur 10).



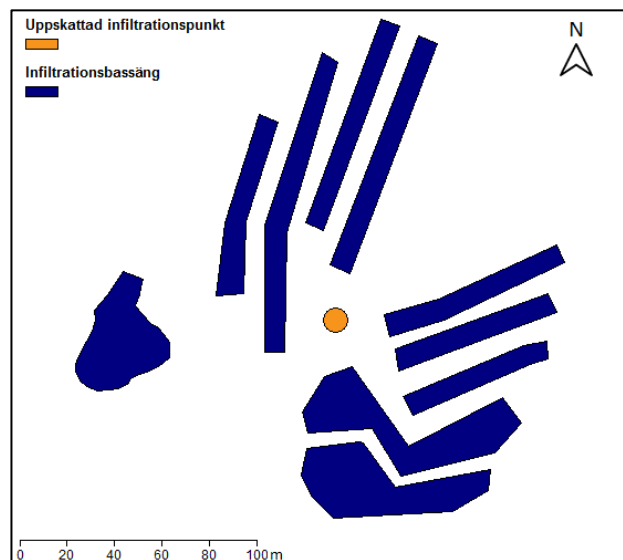
**Figur 9** Illustration över de tolv grundvattenbrunnarna i Storvads grundvattentäkt. I den konceptuella modellen approximerades det totala uttaget i täkten till att komma från den punkt där brunnen i huv 7 är belägen.



**Figur 10** Illustration av Galgbackens grundvattentäkt. Den grundvattenbrunn som valdes för att markera platsen där grundvattenuttag sker är markerad i grönt.

### 3.5.3 Infiltrerad mängd

Konstgjord infiltration sker inom det modellerade området endast i Tunåsens infiltrationsanläggning. Då de tio infiltrationsbassängerna används växelvis valdes punkten för infiltration till mitten av bassängområdet (figur 11).



**Figur 11** Den uppskattade infiltrationspunkten för Tunåsens infiltrationsanläggning i förhållande till de tio infiltrationsbassängerna.

### **3.5.4 Grundvattenbildning**

Från sammanställda jordlagerdata blev det tydligt att översta lagret i fokusområdet kunde uppskattas till att bestå av antingen lera eller genomsläppliga jordarter. Ett värde för vardera materialtypen var därmed nödvändigt. Överlagrande lera antogs vara i stort sett ogenomsläpplig. Utifrån uppgifter om grundvattenbildningen i morän, fint material respektive grovt material gjordes bedömningen att värdet för grovt material var mest passande, då det ofta visade sig vara sand och grus som utgjorde det översta lagret när lagerföljden inte täcktes av överlagrande lera.

Eftersom det saknades tillräcklig information om bland annat evapotranspirationen i området, togs beslutet att basera värden på den naturliga grundvattenbildningen på ett av Rodhe, Lindström, Rosberg och Pers (2006) modellerat värde. Värdet genererades utifrån en modell som baserat på vattenbalansberäkningar och med användning av delar av HBV-modellen uppskattade värden på grundvattenbildning för svenska typjordar.

### **3.5.5 Grundvattennivåer**

Punkter inom fokusområdet där grundvattennivåer var kända specificerades som fyra av de punkter där automatiska mätningar görs. Dessa punkter var LM20 och LM21 i Storsvad, LM90 i Tunåsen och LM120 i Galgbacken.

### **3.5.6 Hydraulisk konduktivitet**

Som ett sista steg i uppbyggnaden av den konceptuella modellen valdes för varje lagerindex ett värde eller ett intervall på hydraulisk konduktivitet. Intervallet för det genomsläppliga lagret valdes utifrån de utförda beräkningarna. Detta gjordes genom en sammanvägd bedömning av de tre beräkningsmetoderna och deras respektive resultat avseende den integrerade horisontella hydrauliska konduktivitetens variation.

## **3.6 MODELLERING**

Den matematiska modellen skapades och kördes med användning av programmen GMS (Groundwater Modeling Systems) från Aquaveo, MODFLOW-2000 och MODPATH. Detta gjordes av Jean-Marc Mayotte vid institutionen för geovetenskaper på Uppsala universitet. En kort sammanfattning av den använda programvaran samt av Jean-Marcs arbete med uppbyggnaden av modellen i GMS och modellkörningarna i MODFLOW-2000 och MODPATH ges nedan.

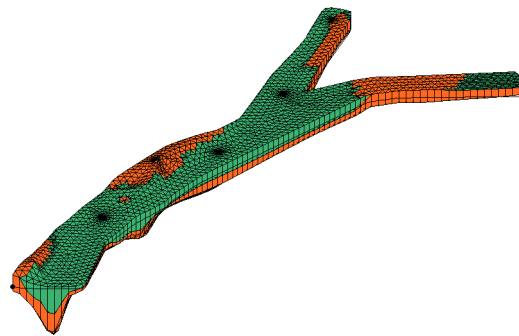
### **3.6.1 Programvara för modellering**

Arbetet med uppbyggnaden och körningen av den matematiska modellen började med att modellområdet byggdes upp i GMS. Här specificerade Jean-Marc utsträckningen och utseendet av det rutnät som skulle komma att bilda modellens område. Med hjälp av GMS specificerades även de indata som sedan skulle användas för tidsberoende modellkörningar i MODFLOW. Målet med dessa tidsberoende körningar var att beräkna grundvattennivåer i modellens olika celler. På dessa grundvattennivåer baserades till sist simuleringen av transporttiden i MODPATH.

### **3.6.2 Implementering av konceptuell modell**

Baserat på det de sammanställda lagerföljderna och de ingående jordarternas uppdelning i lågpermeabel lera och i genomsläppligt material byggdes ett rutnät med två lager upp. De två lagrens utseende mellan de kända lagerföljderna konstruerades i två steg. I det första steget skapades profiler mellan borrhålen och i det andra fylldes de tomma bitarna mellan profilerna igen genom användande av linjär interpolation. De två

lagren och rutnätet ses i figur 12, där det gröna lagret visar lågpermeabel lera och det orange lagret visar genomsläppligt material.



**Figur 12** Resultatet av interpoleringen mellan de tidigare skapade profilerna. Grönt markerar överlagrande lera och orange markerar genomsläppligt material. Bilden är framtagen av Jean-Marc Mayotte och publicerad med tillstånd.

Den matematiska modellen konstruerades så att den täckte ett större område än den konceptuella. Detta gjordes av två anledningar. Den först anledningen var att det gjorde det möjligt att ta hänsyn till det flöde som kommer till Storvad norrifrån.



**Figur 13** En förenklad illustration av inflöden (gröna), utflöden (blå) och randvillkor (röda) i den matematiska modellen. Bilden är skapad av Jean-Marc Mayotte och publicerad med tillstånd.

Den andra var att det större området skulle bidra till en förbättrad modellfunktion, eftersom det vid simulering av transporttid inte är önskvärt att det sker pumpning i någon av ränderna.

Inom det område som täcktes av den matematiska modellen inkluderades infiltrationsanläggningarna i Lövstalöt, Vallskog och Tunåsen. Grundvattenuttagen i Storvad och Gälgbacken inkluderades också (figur 13).

NE BC betyder *Northeast boundary condition* och markerar var den matematiska modellens nordöstra avgränsning och randvillkor sattes. På samma sätt anger NW BC modellens nordvästra avgränsning. Både det nordvästra randvillkoret vid Lövstalöt och det nordöstra randvillkoret vid Östa sattes till att ha en konstant grundvattennivå. Modellens södra gräns drogs i Stadsträdgården, även där med ett randvillkor med konstant nivå.

I modellen specificerades det att vatten endast kunde tas ut och föras in i modellen vid infiltrationsanläggningar vid grundvattentäcker och vid de modellgränser där randvillkoret var en



konstant grundvattennivå. Var detta gjordes specificerades utifrån den i detta arbete framtagna konceptuella modellen. Modellens övriga gränser var täta, precis som i den konceptuella modellen. Antagandet att inget vatten tillfördes modellvolymen genom naturlig grundvattenbildning gjordes också.

Inför simuleringarna gavs alla celler i lagret med lågpermeabel lera en hydraulisk konduktivitet på  $4,16 \cdot 10^{-12}$  m/s. Utifrån fyra av Jean-Marc beräknade aritmetiska medelvärden, vilka var baserade på de i detta arbete beräknade intervallen på hydraulisk konduktivitet för alla lagerföljder, gavs därefter alla celler i det genomsläppliga lagret ett och samma värde. Värdena som användes var  $3,5 \cdot 10^{-5}$  m/s,  $1,9 \cdot 10^{-3}$  m/s,  $1,6 \cdot 10^{-4}$  m/s och  $2,1 \cdot 10^{-2}$  m/s och gavs beteckningarna scenario A-D. Scenario A och B motsvarade det mest rimliga lägsta respektive högsta beräknade värdet på hydraulisk konduktivitet. Scenario C och D motsvarade minimum- och maximumvärdet på beräknad hydraulisk konduktivitet. Det genomsläppliga materialet antogs vara anisotropt med den huvudsakliga grundvattenströmningen i horisontellt led.

Infiltrations- och uttagsmängderna i de olika punkterna var de för den konceptuella modellen framtagna medelvärdena för det hydrologiska året 2011-2012. Slutligen antogs det genomsläppliga lagret vara mer permeabelt i horisontellt led än i vertikalt led. För det lager som innehöll genomsläppliga jordarter valdes en naturlig grundvattenbildning på 252 mm/år baserat på underlagsdata från SMHI för figur A1 och A3 i Rodhe m.fl. (2006).

Modellen kalibrerades inte eftersom det var variationerna i den beräknade transporttiden som var av intresse och inte det specifika värdet.

### **3.6.3 Transporttid**

Modelleringen av transporttid skedde för tidsberoende förhållanden och för de i föregående avsnitt angivna värdena på hydraulisk konduktivitet. I simuleringen följdes 72 partiklar, vilkas utgångspunkt var de nio celler som omgav den punkt som markerade Tunåsen. I början av varje simulering placerades åtta av dessa partiklar i var och en av de nio cellerna. Transporttiden simulerades genom att tiden det tog för dessa partiklar att nå antingen Galgbackens grundvattentäkt eller Storsvads grundvattentäkt beräknades.

## 4 RESULTAT

Litteraturstudien visade att det är Vattenbyggnadsbyrån (VBB) som stått för det mest omfattande arbetet med att kartlägga Uppsalaåsens uppbyggnad. Ett antal spårämnesförsök och teoretiska beräkningar på grundvattnets hastighet har under perioden 1956-1974 utförts både kring infiltrationen i Stora Vallskog och för sträckan mellan Tunåsen och Galgbacken. Golder Geosystem AB och Golder Associates AB har vidare undersökt åsens totala grundvattenmagasin genom upprättandet av en matematisk modell. Utöver detta har två licentiatavhandlingar behandlat Tunåsen. I dagsläget arbetar SGU kontinuerligt med att sammanställa information om jordlagerföljder.

Informations-sammanställningen resulterade i 207 lagerföljder. När den integrerade horisontella konduktiviteten skattades baserat på dessa erhöles en variation på  $10^{-11} - 1$  m/s. Baserat på de siktanalyser som gjorts på 28 av lagerföljderna skattades variationen till  $4,2 \cdot 10^{-4} - 4,6 \cdot 10^{-2}$  m/s. Överslagsberäkningen som utfördes baserat på grundvattenföring och hydraulisk gradient resulterade i variationen  $1,1 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Den konceptuella modellen begränsades av grundvattenmagasinets utsträckning, samt av markytans och berggrundens läge. Flöde tilläts passera över avgränsningarna i norr och söder, men inte i öst, väst eller över bergytan. Den variation på skattad integrerad hydraulisk konduktivitet som utifrån beräkningarna kopplades till det genomsläppliga lagret i den konceptuella modellen var  $4,2 \cdot 10^{-4} - 4,6 \cdot 10^{-2}$  m/s.

### 4.1 LITTERATURSTUDIE OCH INFORMATIONSSAMLING

Vattenbyggnadsbyrån, VBB, står för det mest omfattande underlaget. De har upprättat ett stort antal jordartsprofiler, främst för Uppsalaåsen norr om Galgbacken, samt utfört en matematisk modellstudie över Uppsalaåsen i syfte att utreda hur grundvattenuttag och infiltration bäst skulle kunna kombineras. Tre utredningar av grundvattnets hastighet har gjorts, varav en av VBB, och Golder Geosystem har i en rapport från 1990 även utrett kapaciteten hos Uppsalaåsen som helhet. Utöver detta har två licentiatavhandlingar i ämnena Uppsalaåsen och Tunåsens infiltrationsanläggning publicerats och seismiska undersökningar har även utförts under 70-, 80-, och 90-talet. SGU jobbar även kontinuerligt med att sammanställa lagerföljder i sin hydrogeologiska databas.

#### 4.1.1 VBB: hydrogeologiska undersökningar

VBB utförde under 50-, 60-, och 70-talen undersökningar för att utreda möjligheten att utöka Uppsalas vattenförsörjning i takt med att vattenbehovet ökade. I början av 50-talet baserades Uppsalas hela vattenförsörjning på två grundvattentäkter: en i Galgbacken och en i Stadsträdgården (VBB, 1955). I takt med att vattenanvändningen ökade, sänktes grundvattenytan mer och mer (VBB, 1958). Till följd av detta utredde man olika möjligheter till att förstärka grundvattenflödet i åsen. I utredningsarbetet utfördes ett stort antal rekognosceringsborrningar i området mellan Galgbacken och Svista (Bergström, 1986; VBB, 1955, 1958, 1959, 1960). Från dessa borrningar finns borrhålsprofiler och lagerföljder dokumenterade i respektive års rapport. För vissa borrhål finns det även siktcurvor. Dessa är dock inte alltid helt kompletta. Borrhålens positioner finns även utmärkta på kartor. Till följd av att många av undersökningarna gjordes innan GPS fanns, saknas dock koordinater.

#### 4.1.2 VBB: matematisk modell över Uppsalaåsen

Information från de rekognosceringsborrningar och seismiska mätningar som utfördes under 50- till 70-talet ligger till grund för en matematisk modellstudie av Uppsalaåsen

som stod färdig 1979 (VBB, 1979). Syftet med denna studie var att genom att modellera åsen avgöra den mest fördelaktiga fördelningen mellan uttag och infiltration för att grundvattenytan även i framtiden skulle hållas på en önskvärd nivå. I rapporten ges en beskrivning av geologiska och hydrogeologiska förhållanden i Uppsalaåsen och Vattholmaåsen och tre geologiska profiler redovisas. En beskrivning av modellens uppbyggnad och kalibrering ges också och modellområdet illustreras. Utifrån information om berggrundens läge finns även en bergnivåkarta upprättad.

#### 4.1.3 Grundvattnets hastighet

Under perioden 1956-1974 undersöktes grundvattnets hastighet genom ett antal beräkningar och spårämnesförsök. Den första beräkningen gjordes av VBB 1956 (VBB, 1958) i samband med att en försöksinfiltration vid Tunåsen utfördes. Genom att följa det infiltrerade vattnets påverkan på systemet uppskattades grundvattenhastigheten mellan Tunåsen och Galgbacken till 9 m/dygn.

Den 18 juni 1958 inleddes det första spårämnesförsöket, då färgämnet fluorescein tillsattes i den för tillfället konstruerade försöksinfiltrationsbassängen i Tunåsen. Efter 135 dygn upptäcktes ämnet i observationsrör 5201, vilket ligger vid Galgbackens grundvattentäkt. Utifrån detta beräknades en grundvattenhastighet på 7,5 m/dygn (Bergström, 1986).

I början av mars 1960 påbörjades nästa spårämnesförsök. Enligt uppgift från Bergström (1986) gjordes detta för att komplettera de två föregående undersökningarna. Denna gång tillsattes tre olika ämnen i tre olika observationsrör. Fluorescein (uranin) tillsattes i rör 5902, en natriumkloridlösning tillsattes i rör 5901 och rent magnesiumsulfat tillsattes i rör 5903. Efter mellan 90 och 110 dygn påträffades mycket låga koncentrationer av ämnena vid Galgbacken. På grund av dessa låga koncentrationer anses det råda det en hel del osäkerhet kring det beräknade värdet på 6 m/dygn. Dessutom finns risken att en viss del av det sulfat som tillsattes i form av magnesiumsulfat kan ha adsorberats på vägen, vilket kan ha påverkat transporttiden.

Utöver de beräkningar som gjorts för sträckan Tunåsen-Galgbacken gjordes även försök längre norrut under 1973 och 1974. I augusti 1973 påbörjades ett försök av AB Isotopteknik där fokus låg på att undersöka transporttiden mellan den vid tidpunkten tilltänkta nya infiltrationsanläggningen i Stora Vallskog och uttagspunkten i Storvad. Till en början tillsattes ett krom-EDTA-komplex i observationsrör 7314 beläget ca 1200 m norr om Storvad (Bergström, 1986). Innan försöket startade hade man med hjälp av en uppskattad grundvattenföring beräknat en grundvattenhastighet på 10-15 m/dygn. Resultatet av spårämnesförsöket visade dock på en hastighet på hela 60 m/dygn. Till följd av att resultatet skiljde sig så pass mycket från det beräknade värdet gjordes ytterligare ett försök den 25 oktober 1973. Detta andra försök gav utslag i form av två koncentrationstoppar. Utifrån den största koncentrationstoppen beräknades även i detta försök en grundvattenhastighet på runt 60 m/dygn.

Till följd av de höga hastigheterna som uppmättes i försöken under 1973, utförde AB Isotopteknik ytterligare två försök under 1974 (AB Isotopteknik, 1974, Bergström, 1986, Sidenvall, 1977a). Detta för att säkerställa att transporttiden mellan den tilltänkta infiltrationsanläggningen i Stora Vallskog och uttagspunkten i Storvad inte skulle bli för kort. Båda försöken gjordes i anslutning till att försöksinfiltrationen i Stora Vallskog påbörjades och innefattade såväl temperatur- som koncentrationsmätningar. I det första försöket tillsattes 1 curie ( $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq)  $^{51}\text{Cr}$ -EDTA i infiltrationsbassängen, med anledning till att man önskade mäta grundvattenhastigheten nära infiltrationsplatsen. Koncentrationen mättes därefter i observationsrören 7401, 7410 och 7411, vilka alla är belägna på kort avstånd från infiltrationsbassängen. I det andra försöket tillsattes 12 kg inaktivt Cr-EDTA i infiltrationsbassängen med avsikt att beräkna transporttiden till

grundvattentäkten i Storvad. Det första försöket resulterade i medelvärdena 4 m/dygn baserat på temperaturmätningar, 7 m/dygn baserat på bland annat hårdhet (dH°) och syrenehåll och 9-10 m/dygn baserat på koncentrationmätningar. Till skillnad från temperaturmätningar och kemiska parametrar hos vattnet påverkas inte <sup>51</sup>Cr-EDTA av omgivningen. Den beräknade hastigheten på 9-10 m/dygn kan därmed enligt Bergström (1986) vara den som är mest trolig av de tre. Det andra försöket resulterade i en beräknad grundvattenhastighet på 15 m/dygn för sträckan Stora Vallskog-Storvad (Bergström, 1986, Sidenvall, 1977b). Sidenvall (1977a) anger dock att de av AB Isotopteknik (1974) uppmätta värdena bör användas med försiktighet, då det vid analysen visade sig att kontaminering av <sup>51</sup>Cr-EDTA skett vid laboratoriet där proven förvarats och analyserats.

#### **4.1.4 Golder Geosystem AB och Golder Associates AB**

I februari 1990 publicerade Golder Geosystem AB i en rapport en grundvattenmodell för Uppsalaåsen (Golder Geosystem AB, 1990). Syftet med modellen och rapporten var att undersöka det totala vattenmagasinet i åsen, med skälet att man dittills endast undersökt kapaciteten hos de olika vattentäkterna separat. Till modelleringen användes en tvådimensionell modell med ett lager och frågeställningar kring bland annat hur grundvattenytan påverkas om ingen konstgjord infiltration används och hur grundvattenytan påverkas av ett torrår utreddes. Ett optimalt grundvattenuttag för år 2020 beräknades också. Resultaten av studien inkluderar att grundvattenytan skulle sänkas 5-7 m i såväl området mellan Lövstalöt och Galgbacken som mellan Fullerö och Vattholma om ingen konstgjord infiltration utfördes. Under torrår anges en möjlig avsänkning på 0,5 m om mängden konstgjord infiltration inte ökas. Utöver detta redovisas olika möjliga kombinationer av uttags- och infiltrationsmängder.

1995 publicerade Golder Associates AB *Kompletterande modellberäkningar: Uppsala vattenförsörjning*. Utredningen använde en uppdaterad version av den ovan beskrivna grundvattenmodellen. I rapporten utreddes hur ett ökat grundvattenuttag vid Storvads alternativt Sunnerstas grundvattentäkt skulle påverka grundvattenytan. Anledningen till studien var att en önskan fanns om att sluta ta vatten från Stadsträdgårdens grundvattentäkt i och med de planer som fanns på att upprätta avkalkningsanläggningar för att minska hårdheten på vattnet. Samtidigt önskade man avsluta uttaget vid Galgbackens vattentäkt. Resultatet av studien visar på att föreslagna förändringar av grundvattenuttaget i någon av de två täkterna påverkar grundvattennivån, i vissa fall med så mycket som upp till 2 m.

#### **4.1.5 Licentiatavhandlingar**

1970 publicerades *Grundvatten i Uppsalatrakten* (Sidenvall, 1970). I den sammanställer Sidenvall till viss del det material som vid tidpunkten fanns kring grundvatten i Uppsala. Han diskuterar även Uppsalas framtida vattenförsörjning.

*The artificial recharge of Tunåsen, Uppsala: A hydrochemical consideration* publicerades 1989 (Morosini, 1989). Avhandlingen rör de hydrokemiska aspekterna kring infiltrationen av ytvatten i en åsakvifer.

#### **4.1.6 Seismiska undersökningar**

Seismiska undersökningar har utförts av bland annat SGU under 90-talet (Wällberg & Wikner, 1993), då SGU på Uppsala kommuns begäran utförde undersökningar i närheten av Storvads grundvattentäkt. Syftet med undersökningarna var främst att utreda mäktigheten hos isälvsavlagringarna och djupet till berggrunden. Resultaten visade på att det i området finns en fördjupning i berggrunden, samt antingen en betydande sprickzon eller ett system av sprickor. Isälvsavlagringarnas mäktighet

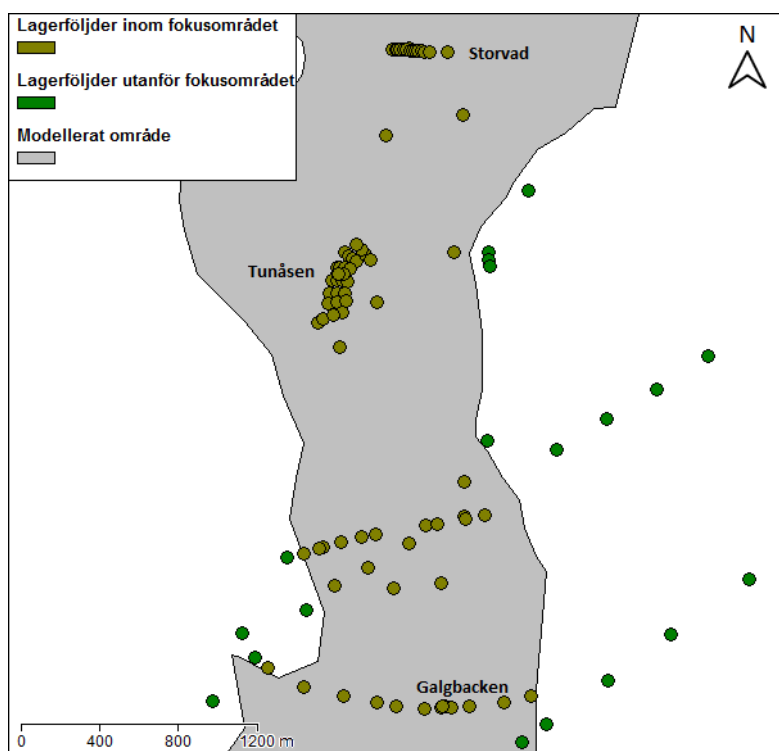
uppskattades genom undersökningarna till uppemot 50 m. I rapporten redovisas seismiska profiler samt jordlagerföljder över de tolv grundvattenbrunnarna vid vattentäkten.

#### 4.1.7 SGUs hydrogeologiska databas

SGU arbetar kontinuerligt med att sammanställa lagerföljder från såväl brunnborrningar som från rekognosceringsborrningar och seismiska undersökningar.

### 4.2 INFORMATIONSSAMMANSTÄLLNING

Totalt sammanställdes 207 lagerföljder med koordinater från strax söder om Björklinge och Vattholma i norr till Kungsängsleden i söder. Av dessa var 78 lokaliserade inom fokusområdet (figur 14).



Figur 14 Sammanställda lagerföljder inom fokusområdet.

### 4.3 DOKUMENTERADE OSÄKERHETER

#### 4.3.1 Jordlagerdata

Utifrån de jordlagerdata som sammanställdes anses osäkerheter främst vara relaterade till kornstorleksskalor, beskrivningssätt, kornstorleksfördelning och undersökningsmetod. Dessa är alla starkt sammankopplade och påverkar i hög grad resultatet av skattningen av den hydrauliska konduktiviteten i olika lagerföljder.

Den första osäkerheten som blev uppenbar var att det inte i någon av VBBs rapporter refereras till vilken kornstorleksskala som ligger till grund för lagerföljdsbeskrivningarna. Som tidigare nämnts är dock skillnaderna mellan de två möjliga äldre skalorna marginell, vilket betyder att bristen på hänvisning inte borde bidragit med alltför stor osäkerhet. Det är istället mer sannolikt att det skulle kunna leda till problem när det gäller det faktum att man idag använder *mellangrus* för att hänvisa till den fraktion som enligt de äldre skalorna kallats *grovt grus*.

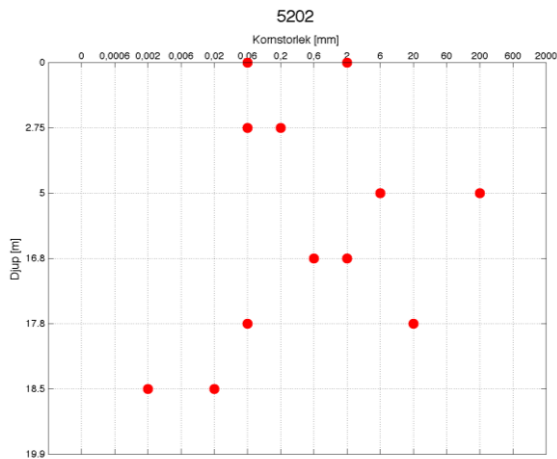
En annan osäkerhet som blev tydlig under arbetets gång är att sättet som jordlagren beskrivs på skiljer sig såväl mellan rapporter som inom rapporter. Detta gör det rimligt att tro att fler än en person jobbat med att sammanställa informationen. I figur 15 visas ett utdrag ur VBBs rapport från 1955, där skillnaden i beskrivningen av två borrhål tydligt visas. I borrhål 5213 har man vid upprepning av samma jordart använt sig av upprepningstecken ("), medan man i borrhål 5214 även använt sig av termen *do*. Efter kontakt med bland annat SGU (Björn Wiberg, personlig kommunikation, 2013-10-29) gjordes bedömningen att *do* står för *dito* och alltså bör vara en annan form av att upprepa det som står ovan, men det kunde vid den aktuella tidpunkten inte helt verifieras.

R5213	+15,64	+13,02	25,72	0-5,80	grovt grus .
				-17,00	grus
				-21,50	sand
				-22,50	"
				-25,72	"
R5214	+18,58	+14,41	17,80	0-1,50	lera, stenbl.
				-9,00	grus, stenbl. osorterad, del- vis skarpkant.
				-14,00	do
				-15,00	do, ngt sandbl.
				-17,80	do, " "

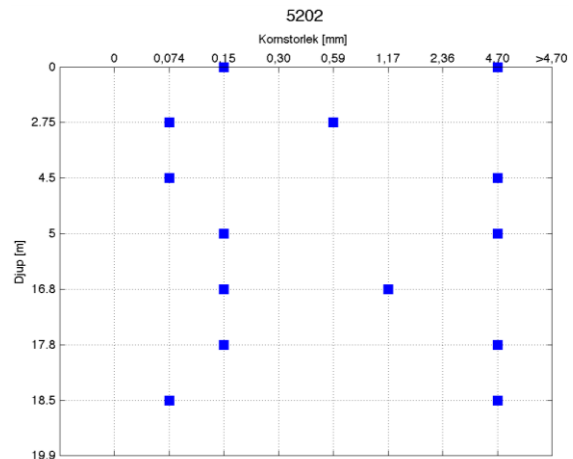
Figur 15 Utdrag ur VBB (1955) som visar på skillnader i beskrivningssätt av lagerföljderna.

En annan osäkerhet som även den visas i figur 15 är att man inte konsekvent använt antingen huvudfraktioner eller underfraktioner. Det översta lagret i borrhål 5213 beskrivs med underfraktionen *grovt grus*, medan lagret under beskrivs med huvudfraktionen *grus*. Oklarheter finns därmed relaterade till såväl den skillnad i kornstorlek som detta innebär som till vad skillnaden beror på.

Det är inte bara beskrivningssättet som bidrar till att kornstorleksfördelningen anses kunna bidra till ett stort spann i skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet. Om det genomgående funnits information kring jordarternas sammansättning utifrån till exempel siktanalyser, hade det varit möjligt att på ett mer grundligt sätt relatera beskrivningarna till olika fraktioner. Dessvärre fanns siktkurvor endast för 28 av rekognosceringsborrningarna. I figur 16 visas ett exempel på hur stor skillnad det beräknas vara mellan största och minsta kornstorlek i respektive jordlager baserat på jordlagerbeskrivningarna. I figur 17 ses på samma sätt skillnaden mellan största och minsta kornstorlek, men här istället baserat på siktkurvan för borrhålet. Kornstorleksskalan på x-axeln skiljer sig till följd av att siktanalyserna varken innefattar de allra finaste eller allra grövsta fraktionerna. Minsta och största kornstorleksfördelning för respektive lager markeras på den linje som anger den övre gränsen för lagret.



**Figur 16** Uppskattad största och minsta kornstorlek i varje lager för borrhål 5202 baserat på lagerföljdsbeskrivningar.



**Figur 17** Största och minsta kornstorlek i varje lager i borrhål 5202 baserat på siktanalyser.

En sammanställning av kornstorleksdiagrammen visade att den minsta skillnaden i kornstorlek mellan olika lagerföljder såväl som mellan lager inom en och samma lagerföljd finns kring Storvad. Detta kan troligtvis till viss del relateras till bristen på detaljer inom de för Storvad upprättade lagerföljdsbeskrivningarna. Området kring Galgbacken var det område som visade på störst skillnad såväl mellan lagerföljder som inom lagerföljder. Diagram för alla jordprofiler inom fokusområdet redovisas områdesvis i Bilaga D. För de jordprofiler där även siktkurvor finns, redovisas även de ingående kornstorleksfördelningarna utifrån dessa på samma sätt som i figur 16 och figur 17.

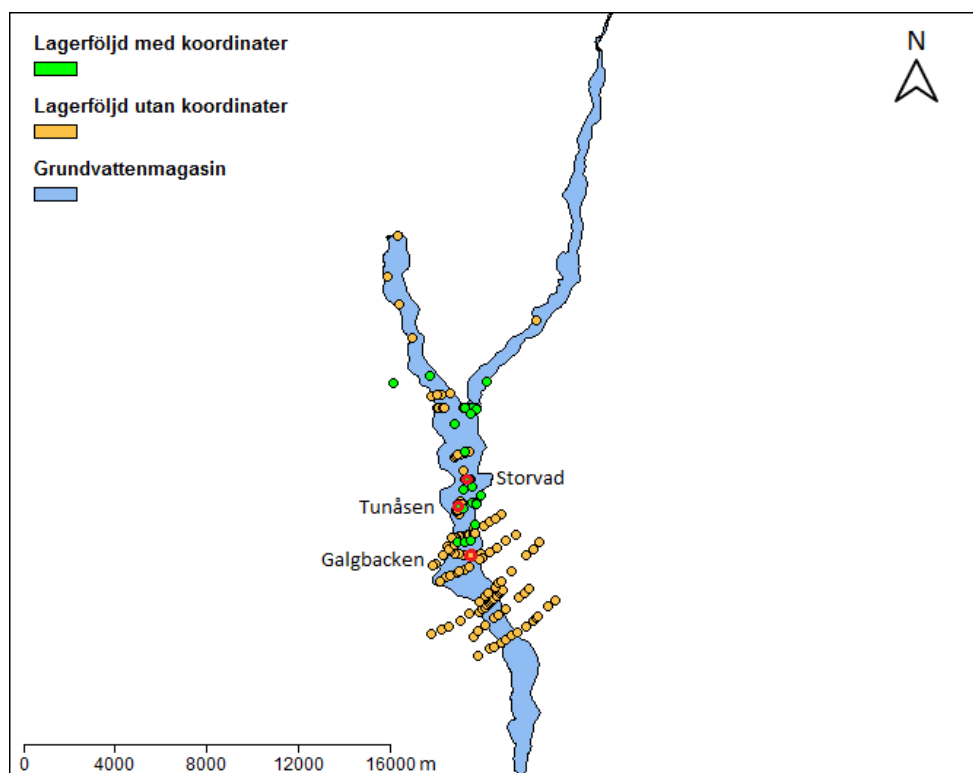
Utöver dessa osäkerheter har det vid upprättande av lagerföljderna använts olika undersökningsmetoder. I alla VBBs rapporter har en 3" jordborr använts och lagerföljderna har upprättats genom att det material som under borrhningen spolats upp antingen med vatten eller med luft därefter undersökts okulärt (VBB 1955, 1959, 1960). Ett antal av de från SGU sammanställda lagerföljderna har istället upprättats genom sonderingar. Sonderingar bygger på användandet av elastiska vågor, vilka sprider sig nedåt i marken och refrakteras när de når en gräns mellan två jordlager (Sjögren, 1984). Vågens hastighet kan beräknas utifrån tiden det tar från att vågen skickas ut till att den återigen mäts med en geofon. Utifrån denna hastighet uppskattas sedan lagerföljden. Enligt Sjögren (1984) finns det dock tre aspekter som måste uppfyllas för att resultaten ska vara pålitliga: våghastigheten måste skilja sig mellan material avsatta i olika lager, skillnaden i hastighet mellan olika lager måste vara stor och våghastigheten måste öka med djupet. Utifrån det menar Sjögren (1984) att problem kan uppstå om en lagerföljd till exempel börjar med lera, då vågor som rör sig genom lera får en högre hastighet än vågor som rör sig genom till exempel sand eller grus. Inte heller finns det några specifika hastigheter som gäller för en typ av material, utan de uppmätta hastigheterna måste för varje område kopplas till den för området specifika geologin. Enligt Sjögren (1984) kan detta göras genom att borrhål upprättas, i vilka lagerföljden noggrant undersöks. Då de sammanställda sonderingarna alla utfördes i områden täckta av ett på sina ställen mäktigt lager med lera, relativt långt från andra rekognosceringsborrningar, samt då det var nödvändigt att noggrannare specificera det i beskrivningen angivna *frikionsmaterialet*, är det inte orimligt att lagerföljderna från just sonderingarna innehåller ett relativt stort mått osäkerhet.

Slutligen bör det påpekas att de lagerföljder som är upprättade skiljs åt av stora områden där inga undersökningar gjorts. Då man måste förlita sig på interpolering för

att täcka dessa områden, men inte har någon möjlighet att kvalitetssäkra den gjorda interpolationen, finns det en stor risk att stora fel i de interpolerade lagerföljderna uppkommer.

### 4.3.2 Koordinater

För de 207 jordprofiler som sammanställdes fanns vid arbetets början endast koordinater för 35 stycken, vilket innebar att koordinater fick tas fram manuellt för 172 av profilerna (figur 18). Bristen på koordinater samt originalkartornas upplösning gjorde att det finns en förhållandevis stor osäkerhet relaterad till de framtagna koordinaterna. Den största osäkerheten borde rimligtvis finnas hos de koordinater som baserades på de kartor som anpassades manuellt i Adobe Photoshop innan de georefererades i Saga GIS, då detta inte är en beprövad metod. För fyra rekognosceringsborrningar var det dock möjligt att jämföra dessa framtagna koordinater med kända koordinater. Utöver detta gick det för borrhål 5702 att jämföra koordinater framtagna från en karta som inte anpassats, utan som georefererats direkt mot Lantmäteriets kartor. Resultatet av dessa jämförelser blev att det skiljer sig mellan 5 och 99 m i N-led och mellan 1 och 54 m i E-led för de anpassade kartorna (tabell 10). För borrhål 5702 är differensen 34 m i N-led och 8 m i E-led. De koordinater som erhöles från kartan över området mellan Faxan och Galgbacken hörde till de med sämst noggrannhet. Från denna karta var det dock endast koordinater för borrhål 5202 som användes i det fortsatta arbetet. För de fem jämförda borrhålen var det överlag N-koordinaterna som hade sämre noggrannhet, då de i avvek i medeltal 46 m. E-koordinaterna avvek i sin tur endast ca 18 m från motsvarande känd koordinat.



**Figur 18** De sammanställda jordprofilernas position i förhållande till grundvattenmagasinet i Uppsalaåsen och Vattholmaåsen. Grundvattenmagasinets utsträckning från SGU (2013c).



**Tabell 10** Beräknad differens mellan kända och framtagna koordinater.

<b>Differens (m)</b>		
<b>Borrhål</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
5203 <sup>1</sup>	99 <sup>3</sup>	19
5204 <sup>1</sup>	71 <sup>5</sup>	3
	76 <sup>3</sup>	3
	12 <sup>4</sup>	17
5213 <sup>2</sup>	17 <sup>5</sup>	40
	5 <sup>5</sup>	1
5702 <sup>1</sup>	34 <sup>4</sup>	8
7316 <sup>1</sup>	54 <sup>5</sup>	54
Medel	46	18,125

<sup>1)</sup> SGU, <sup>2)</sup> Lista över observationsrör, Uppsala vatten och avfall AB

<sup>3)</sup> Karta över Faxan-Galgbacken, <sup>4)</sup> Karta över Tunåsen

<sup>5)</sup> Karta över Läby-Ekolin

För de tolv grundvattenbrunnarna i Storvad erhöles vid jämförelse mellan de framtagna och de kända koordinaterna en differens på mellan 0 och 1 m i såväl N-led som i E-led. I och med detta finns det en god möjlighet att koordinaterna för de närliggande rekognosceringsborrningarna 6310, 6311, 6312 och 6313 är relativt liten.

För de rekognosceringsborrningar som givits koordinater framtagna av SGU från Lantmäteriets fastighetskarta antas osäkerheten vara relativt liten. Viktigt att notera angående detta är dock att de koordinater som gavs för 5703 vid användning i georefereringen resulterade i ett mycket tveksamt resultat. Det råder därmed stor risk att dessa inte är korrekt angivna, trots att de kommer från SGU.

#### **4.3.3 Grundvattenuttag**

Osäkerheterna kring de automatiskt mätta volymerna som varje dygn pumpas upp antas vara små, då de regelbundet kontrolleras av driftpersonal innan de godkänns och sparas. De uttagsmängder som ligger till grund för beräkningarna för hydraulisk konduktivitet baserat på Darcys lag är dock baserade på diagrammet *Pumpad vattenmängd ur Uppsalaåsen*, vilket täcker åren 1948-1976 (Uppsala vatten och avfall AB, u.å:b). Diagrammet saknar såväl datum som upphovsman och är dessutom inte av alltför god kvalitet, vilket gör det svårt att läsa av värdena helt korrekt. Förhoppningar finns dock om att det inom rimlig framtid är möjligt att hitta de anteckningar som låg till grund för diagrammet, vilket skulle leda till att mer korrekta siffror på uttagsmängder kan erhållas.

Något som kan skapa ytterligare osäkerhet i en eventuell modell är att grundvattenuttaget i såväl Storvad som i Galgbacken approximerades till att ske i mitten av grundvattentäkterna. På både ställena sträcker sig brunnsområdet över en ganska lång sträcka, vilket gör det mycket möjligt att det råder skillnader i förhållandena för två punkter inom området.

#### **4.3.4 Infiltrerad mängd**

De infiltrationsmängder som använts för modelleringen registreras på dygnsbasis och kontrolleras regelbundet innan de förs in i systemet. Därmed är dessa mängder med stor sannolikhet riktiga. De värden på infiltrerad mängd som används för beräkningarna på hydraulisk konduktivitet baserat på Darcys lag är däremot erhållna genom avläsning

från diagrammet *Infiltrerad vattenmängd i Uppsalaåsen*, vilket täcker åren 1948-1974 (Uppsala vatten och avfall AB, u.å:c). Precis som för det diagram som ligger till grund för mängden grundvattenuttag i samma beräkningar, saknar även detta diagram både datum och upphovsman. Kvaliteten på diagrammet är också relativt dålig. Precis som för uttagsmängderna finns dock förhoppningar om att det även här finns möjlighet att hitta de anteckningar som låg till grund för diagrammet.

Något som vidare kan bidra med osäkerhet kring modelleringen, och då i synnerhet kring infiltrationen i Tunåsen, är att infiltrationspunkten approximerades till en punkt i mitten av infiltrationsbassängerna istället för i de faktiska infiltrationsområdena. Utöver detta finns det en viss osäkerhet relaterad till den faktiska mängd som varje dygn infiltreras, då detta inte nödvändigtvis är densamma som den som varje dygn pumpas upp från Fyrisån.

#### **4.3.5 Grundvattenbildning**

Eftersom det värde på grundvattenbildning som användes för grovt material i den konceptuella modellen är baserat på en modell är det naturligt att det är kopplat till osäkerheter. Detta är även slutsatsen som Rodhe m.fl. (2006) drar. Vidare påpekar Rodhe m.fl. (2006) att syftet med modellen främst var att ta fram kartor som visar skillnader i grundvattenbildning mellan delar av Sverige samt skillnaderna mellan grundvattenbildningen i morän, fint material och grovt material. Med andra ord låg inte fokus på att ta fram ett exakt värde. Då det värde som i VISS (2014) uppskattas för Uppsalaåsen uppgår till 260 mm/år, verkar det dock rimligt att tro att de osäkerheter som är relaterade till det frammodellerade värdet inte är oproportionerligt stora.

#### **4.3.6 Berggrundens läge**

Kring berggrundens läge finns stora osäkerheter. I alla undersökningar har det till exempel inte varit möjligt att helt säkert säga att berggrunden har nåtts. Detta har i många fall resulterat i att slutet på lagerföljden beskrivits som *sten, block eller berggrund*. Denna osäkerhet är i synnerhet av betydelse för de utförda sonderingarna, och kommer till följd av att den elastiska vågen refrakteras på samma sätt oavsett om refractionen sker mot block eller berggrund. Osäkerheten finns dock även hos vissa lagerföljder som upprättats genom borrhning, men kan där i många fall reduceras genom att jämföras med resultatet av närliggande borrhningar.

Ytterligare osäkerhet relaterad till berggrundens läge finns med avseende på grundvattenmagasinets avgränsningar i norr. Enligt vissa uppgifter ska det finnas en bergströskel två kilometer söder om Björklinge samt en vid Lena kyrka i Vattholma (Sven Ahlgren, personlig kommunikation, 2013-12-10; VBB, 1955). Tröskeln söder om Björklinge nämndes första gången i VBBs rapport från 1955, där det även föreslogs att ytterligare borrhningar skulle göras för att avgöra om detta stämde. Enligt uppgift från SGU (Magdalena Thorsbrink, personlig kommunikation, 2013-11-29) är det dock fortfarande osäkert vilka förhållanden som faktiskt råder på platsen. Angående den eventuella bergströskeln vid Lena kyrka, styrker grundvattenkartan över Uppsala att det finns någon form av skillnad i hydraulisk konduktivitet på platsen. Dock ges ingen närmare förklaring till detta.

## 4.4 SKATTNING AV INTEGRERAD HYDRAULISK KONDUKTIVITET

### 4.4.1 Olika jordarters hydrauliska konduktivitet

I litteraturen kunde intervall på hydraulisk konduktivitet (tabell 11) hittas för alla jordarter förutom grovt grus, stensjord och blockjord. Det intervall som uppskattades för dessa samt de intervall som för övriga jordarter bestämdes utifrån rimlighetsanalysen redovisas i tabell 12. För lera valdes  $10^{-11}$  m/s som undre gräns endast för att använda ett värde skilt från 0.

**Tabell 11** Framtagna värden på hydraulisk konduktivitet för olika jordtyper. Källorna anges med fotnot. I de fall flera källor angett samma värde är samtliga källor angivna vid detta värde.

Jordart	Värde 1 (m/s)	Värde 2 (m/s)	Värde 3 (m/s)	Värde 4 (m/s)
Lera	$<10^{-9}$ (1,2,3)	$10^{-10}$ - $10^{-8}$ (4)	$10^{-11}$ - $4,7 \cdot 10^{-9}$ (5)	
Finmo	$10^{-7}$ - $10^{-5}$ (2,8)	$10^{-8}$ - $10^{-5}$ (7)		
Mjäla	$10^{-9}$ - $10^{-7}$ (2)	$10^{-10}$ - $10^{-7}$ (7)		
Grusig/stenig morän	$10^{-7}$ - $10^{-5}$ (2)			
Finsand/grovmo	$10^{-6}$ - $10^{-4}$ (1,2)	$2 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-4}$ (5)		
Mellansand	$10^{-5}$ - $10^{-3}$ (1,2)	$5,7 \cdot 10^{-5}$ - $2,3 \cdot 10^{-4}$ (6)	$9 \cdot 10^{-7}$ - $5 \cdot 10^{-4}$ (5)	
Grovsand	$10^{-4}$ - $10^{-2}$ (1,2,3,7)	$10^{-5}$ - $10^{-1}$ (4)	$9 \cdot 10^{-7}$ - $6 \cdot 10^{-3}$ (5)	$2,3 \cdot 10^{-4}$ - $1,1 \cdot 10^{-3}$ (6)
Fingrus	$10^{-3}$ - $10^{-1}$ (1,2,3,8)			
Grovt grus*				
Grus	$10^{-3}$ - $10^0$ (4)	$4,7 \cdot 10^{-2}$ (9)		
Sand och grus	$5,7 \cdot 10^{-5}$ - $1,1 \cdot 10^{-3}$ (6)	$4,7 \cdot 10^{-3}$ (9)		
Sten och block				

<sup>1)</sup> SGF, 2005, <sup>2)</sup> Fagerström & Wiesel, 1972, <sup>3)</sup> SWECO, 2008, <sup>4)</sup> Knutsson & Morfeldt, 1993,

<sup>5)</sup> Domenico & Schwartz, 1998, <sup>6)</sup> Bouwer, 1978, <sup>7)</sup> Grip & Rodhe, 1994, <sup>8)</sup> Espeby & Gustafsson, 1998, <sup>9)</sup> Linsley, Kohler, Paulhus, 1982

\* Enligt äldre kornstorleksindelning

**Tabell 12** Valda värden på hydraulisk konduktivitet. Valet baseras på den utförda rimlighetsanalysen.

Jordart	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Lera	$10^{-11}$ - $10^{-9}$ **
Mjäla	$10^{-9}$ - $10^{-7}$ (2)
Finmo	$10^{-7}$ - $10^{-5}$ (2,8)
Finsand/grovmo	$10^{-6}$ - $10^{-4}$ (1,2)
Mellansand	$10^{-5}$ - $10^{-3}$ (1,2)
Grovsand	$10^{-4}$ - $10^{-2}$ (1,2,3,7)
Sand	$10^{-6}$ - $10^{-2}$ **
Fingrus	$10^{-3}$ - $10^{-1}$ (1,2,3,8)
Grus	$10^{-3}$ - $10^0$ (4)
Grovt grus*	$10^{-2}$ - $10^0$ ***
Sand och grus	$5,7 \cdot 10^{-5}$ - $1,1 \cdot 10^{-3}$ (6)
Stensjord	$10^{0}$ ***
Blockjord	$10^{0}$ ***

<sup>1)</sup> SGF, 2005, <sup>2)</sup> Fagerström & Wiesel, 1972, <sup>3)</sup> SWECO, 2008, <sup>4)</sup> Knutsson & Morfeldt, 1993,

<sup>5)</sup> Domenico & Schwartz, 1998, <sup>6)</sup> Bouwer, 1978, <sup>7)</sup> Grip & Rodhe, 1994, <sup>8)</sup> Espeby & Gustafsson, 1998, <sup>9)</sup> Linsley, Kohler, Paulhus, 1982

\* Enligt äldre kornstorleksindelning

\*\* En kombination av källor har använts

\*\*\* Uppskattat värde till följd av att litteraturvärden saknades

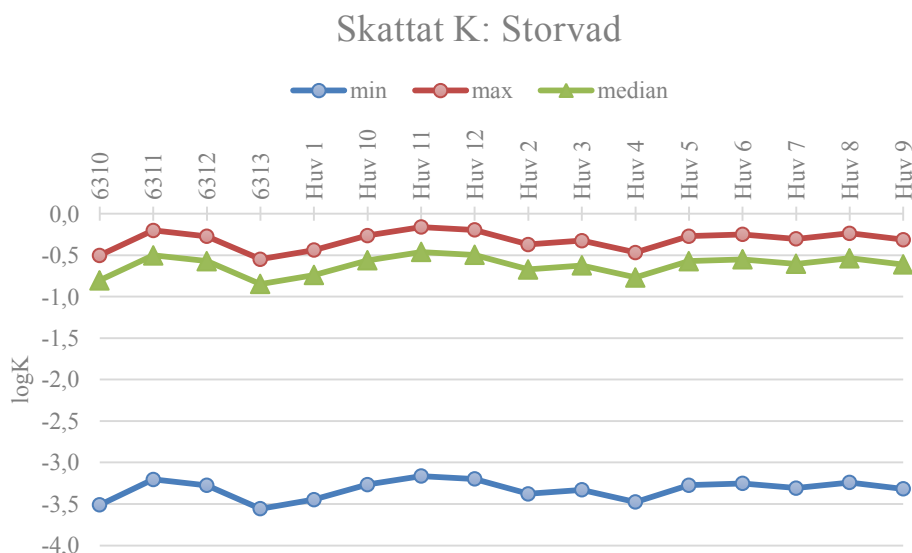
#### 4.4.2 Skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på lagerföljdsbeskrivningar

De fyra scenarion som låg till grund för beräkningarna av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet resulterade för de 78 lagerföljderna inom fokusområdet i en variation på  $10^{-11} - 1$  m/s, där  $10^{-11}$  m/s var det för alla lagerföljder minsta värdet och 1 m/s det största värdet. En jämförelse av medianvärdena för dessa 78 lagerföljder och för vart och ett av de fyra beräkningsscenarioerna visade även på stora skillnader mellan de skattade  $K_{\text{int,H}}$ -värdena (tabell 13). Medianen beräknad för alla 78 lagerföljders medelvärde och för endast den grövsta fraktionen var tre gånger så stor som medianen baserat på endast den finaste fraktionen. Den var också nästan dubbelt så stor som medianen baserad på alla fraktioner. Sammanlagt resulterade medianvärdena i ett intervall på 0,14 – 0,41 m/s. En fullständig redovisning av de för fokusområdet skattade värdena på integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet ges i Bilaga E.

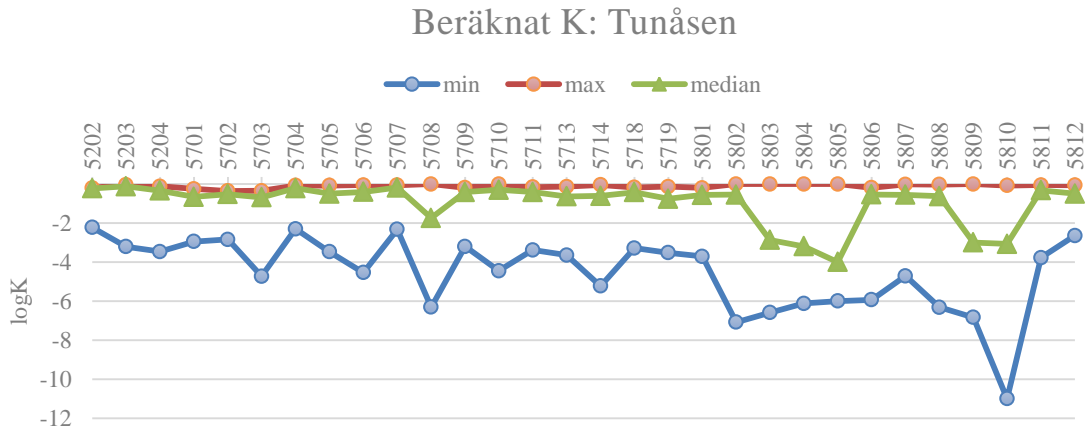
**Tabell 13** Medianvärden på skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet inom fokusområdet.

Styrande kornfraktion	Medianvärde på $K_{\text{int,H}}$ (m/s)
Alla kornfraktioner	0,23
% störst kornfraktion	0,3
Finast kornfraktion	0,14
Grövst kornfraktion	0,41

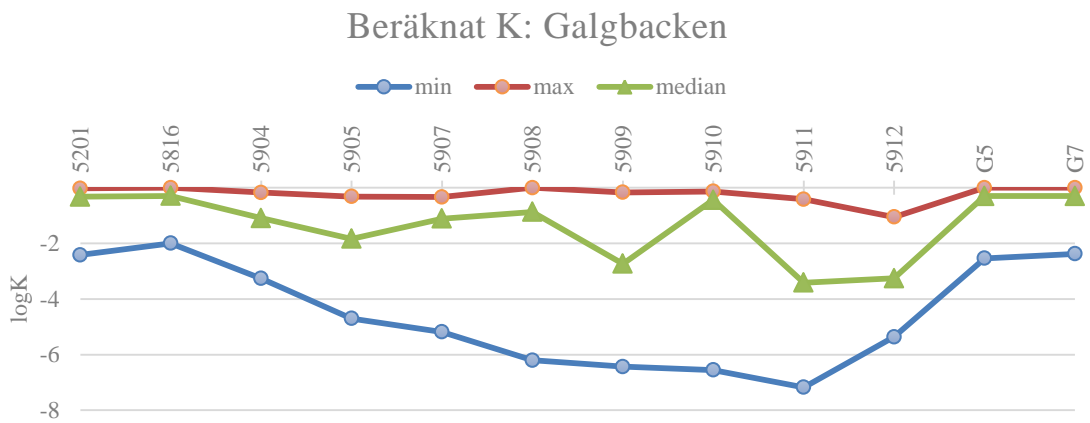
Även skillnader i variationen mellan olika platser inom fokusområdet erhöles. Störst skillnad hittades i Tunåsen, där den skattade integrerade hydrauliska konduktiviteten hade ett intervall på  $10^{-11} - 1$  m/s. I Storvad hittades den lägsta variationen, vilken låg på  $2,8 \cdot 10^{-4} - 6,9 \cdot 10^{-1}$  m/s. Intervallen mellan de enskilda lagerföljdernas högsta och lägsta värde på hydraulisk konduktivitet illustreras i figur 19-figur 22.



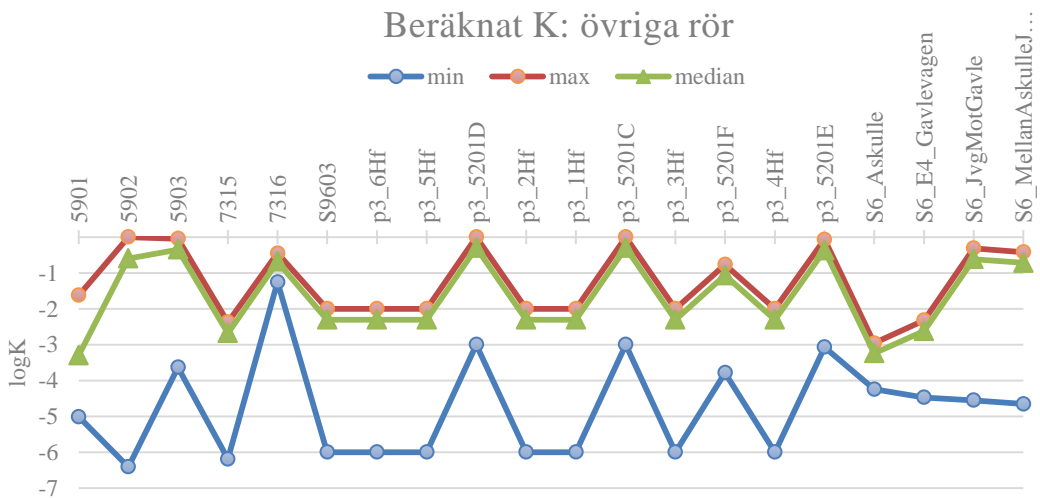
**Figur 19** Skattad högsta och lägsta integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för lagerföljder vid Storvad.



**Figur 20** Skattad högsta och lägsta integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för lagerföljder vid Tunåsen.

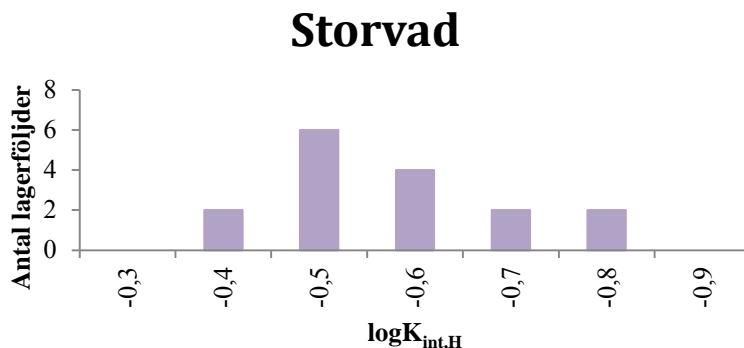


**Figur 21** Skattad högsta och lägsta integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för lagerföljder vid Galgbacken.

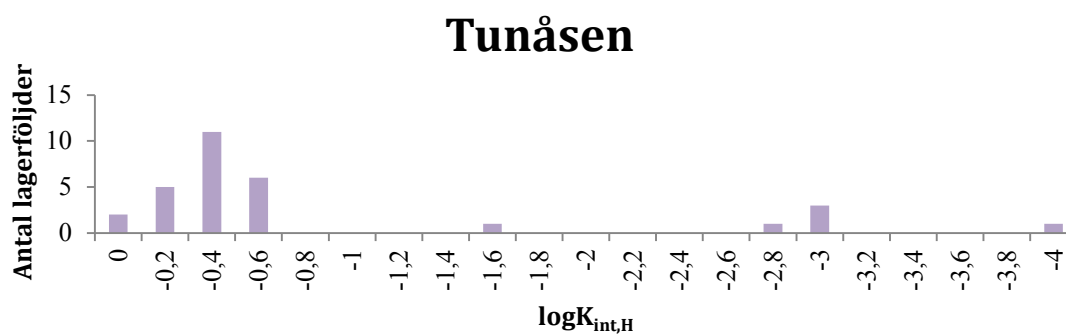


**Figur 22** Skattad högsta och lägsta integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för övriga lagerföljder inom fokusområdet.

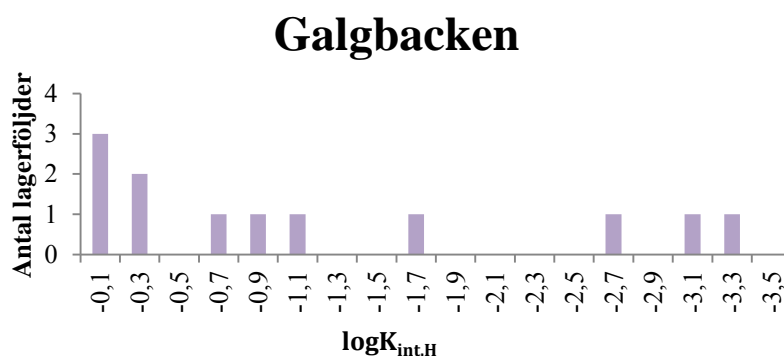
Histogram av de utifrån ekvation (7) beräknade värdena visar på fördelningar med majoriteten av de skattade medianvärdena kring  $10^{-2,3}$ ,  $10^{-0,5}$ ,  $10^{-0,4}$  respektive  $10^{-0,1}$  m/s för de olika områdena (figur 23-figur 26). Detta är baserat på scenariot då alla kornfraktioner tas i beaktande.



**Figur 23** Fördelning av medianvärden på skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för Storvad. Värdena är baserade på litteraturvärden på K för individuella kornfraktioner samt på alla ingående kornfraktioner i varje jordart.

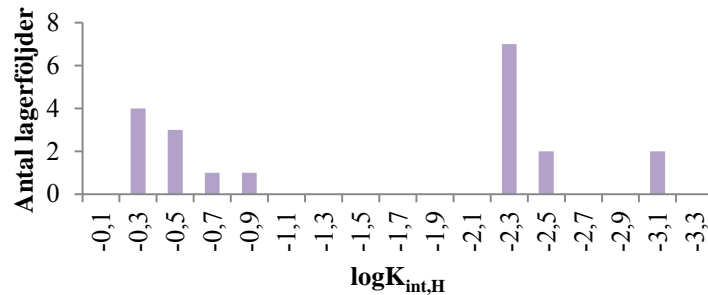


**Figur 24** Fördelning av medianvärden på skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för Tunåsen. Värdena är baserade på litteraturvärden på K för individuella kornfraktioner samt på alla ingående kornfraktioner i varje jordart.



**Figur 25** Fördelning av medianvärden på skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för Galgbacken. Värdena är baserade på litteraturvärden på K för individuella kornfraktioner samt på alla ingående kornfraktioner i varje jordart.

## Övriga lagerföljder



**Figur 26** Fördelning av medianvärden på skattad integrerad hydraulisk konduktivitet för övriga lagerföljder inom fokusområdet. Värdena är baserade på litteraturvärden på K för individuella kornfraktioner samt på alla ingående kornfraktioner i varje jordart.

### 4.4.3 Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på siktanalyser

Beräkningarna baserade på information från de siktanalyser som fanns gjorda för 28 av VBBs rekognosceringsborrningar under 1952 och 1959 (ekvation (10)) resulterade i en variation i form av ett intervall på  $4,2 \cdot 10^{-4} - 4,6 \cdot 10^{-2}$  m/s (tabell 14). Medianvärdet för de undersökta lagerföljderna blev  $2,9 \cdot 10^{-3}$  m/s. För flera borrhål saknades många värden på antingen  $d_{10}$  eller  $d_{60}$ , alternativt så uppfylldes inte kraven på  $d_{10}$  och U. Resultatet erhöles därför endast för sammanlagt tretton lagerföljder.

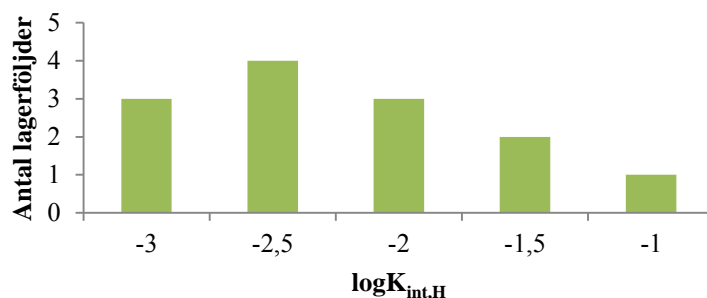
**Tabell 14** Skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet beräknad baserad på information från siktanalyser.

Borrhål	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
5201C	$2,8 \cdot 10^{-3}$
5201E	$4,6 \cdot 10^{-2}$
5201F	$3,3 \cdot 10^{-3}$
5202	$8,5 \cdot 10^{-4}$
5204	$2,9 \cdot 10^{-3}$
5205*	$1,3 \cdot 10^{-2}$
5206*	$1,3 \cdot 10^{-3}$
5207*	$1,2 \cdot 10^{-2}$
5208*	$9,8 \cdot 10^{-4}$
5905	$3,4 \cdot 10^{-3}$
5906	$4,8 \cdot 10^{-3}$
5909	$2,6 \cdot 10^{-3}$
5913*	$4,2 \cdot 10^{-4}$

\* Ej beläget inom fokusområdet

Majoriteten av lagerföljderna hade därmed en integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet på omkring  $10^{-2,5}$  m/s (figur 27).

## K: Siktanalyser



Figur 27 Fördelning av medianvärden på skattad integrerad hydraulisk konduktivitet beräknad utifrån siktanalyser.

### 4.4.4 Överslagsberäkning av hydraulisk konduktivitet baserat på grundvattenföring och hydraulisk gradient

Med Darcys lag (ekvation (1)) som utgångspunkt beräknades för 1956 ett intervall på  $2,6 \cdot 10^{-3} - 5,6 \cdot 10^{-3}$  m/s, för 1957 ett intervall på  $1,1 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}$  m/s och för 1974 ett intervall på  $5,1 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-3}$  m/s (tabell 15). För år 2010-2013 erhöles endast ett värde på  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s. Variationen baserat på grundvattenföring och hydraulisk gradient blev därmed  $1,1 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-3}$  m/s.

De skillnader i grundvattennivå som beräknades mellan observationsrör 5201 och observationsrör Galgbacken uppgick till 1,05 m år 1956 och 0,66 m år 1957. För år 1974 kunde ingen skillnad beräknas då mätdata för dessa punkter saknades.

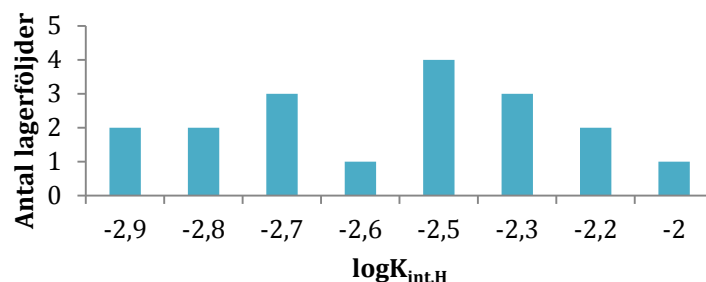
Tabell 15 Skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet i m/s för olika år.

Startpunkt	Slutpunkt	1956	1957	1974	2010-2013
5202	5201	0,0038	0,0016	-	-
	Galgbacken	0,0026	0,0013	-	-
5203	35	-	0,0030	0,0051	-
	5201	0,0042	0,0017	-	-
5205	Galgbacken	0,0028	0,0014	-	-
	35	-	0,0040	0,0097	-
	5201	0,0056	0,0024	-	-
35	Galgbacken	0,0041	0,0019	-	-
	5201	-	0,0014	-	-
LM21	Galgbacken	-	0,0011	-	-
	LM120	-	-	-	0,003

Inom det totala intervallet för de i tabell 15 utförda beräkningarna var de logaritmerade värdena på den integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten centrerade kring  $10^{-2,5}$  m/s (figur 28).



## K: Darcys lag



**Figur 28** Fördelning av skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet beräknad genom applikation av Darcys lag.

### 4.5 KONCEPTUELL MODELL

#### 4.5.1 Avgränsningar, randvillkor och vattenbalans

Avgränsningarna för den konceptuella modellen bestämdes till Storvads grundvattentäkt i norr och Galbackens grundvattentäkt i söder. I östlig och västlig riktning avgränsades den konceptuella modellen av grundvattenmagasinets utbredning, vilken erhöles från grundvattenkartan över Uppsala (SGU, 2013c). De vertikala avgränsningarna valdes till markytan respektive berggrunden.

Flöde tilläts passera över avgränsningarna i norr och söder. I öst och väst ansågs däremot gränserna vara täta, vilket betyder att inget flöde kunde passera över dem. Inget flöde antogs heller kunna passera över den gräns som berggrunden utgjorde. Markytan, vilken bestod av såväl överlagrande lera som av genomsläppligt material, gavs för det genomsläppliga materialet ett randvillkor där flöde kunde passera in i åsvolymer. Till följd av det tidigare gjorda antagandet att inget flöde kunde infiltrera genom den överlagrande leran, erhöles de av lera täckta ytorna randvillkoret att inget flöde kunde passera.

Följande vattenbalans sattes upp för fokusområdet:

$$Q_{norri\text{från}} + Q_{infiltration,Tunåsen} - (Q_{uttag,Storvad} + Q_{uttag,Galbacken}) = Q_{söderut}$$

där  $Q_{norri\text{från}}$  baserades på den vattenbalans som gäller för området norr om Storvad. Vattenbalansen illustreras grafiskt i figur 29.



**Figur 29** Konceptuell modell av fokusområdet. Inflöde till volymen sker i form av flöde norrifrån, samt genom infiltration i Tunåsen. Utflöde till modellen sker i form av grundvattenuttag i Storvads och Galgbackens grundvattentäkter.

Jean-Marc Mayottes simuleringar resulterade i fyra beräknade max-, min-, respektive medeltransporttider för sträckan Tunåsen-Galgbacken respektive två för sträckan Tunåsen-Storvad. Grundvattenflödet rör sig därmed såväl norrut mot Storvad som söderut mot Galgbacken. För sträckan Tunåsen-Galgbacken varierade medeltransporttiden mellan 2,4 och 232,8 dagar och för sträckan Tunåsen-Storvad mellan 34,7 och 310,6 dagar (tabell 16). För scenario B och D fångades inga partiklar upp i Storvad, vilket ledde till att ingen transporttid kunde uppskattas. Hela resultatet av simuleringarna presenteras i Bilaga F.

**Tabell 16** Av Jean-Marc simulerad medeltransporttid i dagar för scenario A-D.

Scenario	Simulerad medeltransporttid i dagar	
	Tunåsen – Galgbacken	Tunåsen - Storvad
A: $K=3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s	72,2	34,7
B: $K=1,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	25,4	-
C: $K=1,6 \cdot 10^{-4}$ m/s	232,8	310,6
D: $K=2,1 \cdot 10^{-2}$ m/s	2,4	-

#### 4.5.2 Grundvattenuttag, infiltrerad mängd och grundvattenbildning

Infiltrationsmängden i Tunåsen beräknades utifrån det hydrologiska året 2011-2012 till i medeltal 9701 m<sup>3</sup>/dygn. För samma period erhöles ett dygnsmedelvärde på 18839 m<sup>3</sup>/dygn för grundvattenuttaget i Storvad och ett dygnsmedelvärde på 7747 m<sup>3</sup>/dygn för uttaget i Galgbacken. Inom fokusområdet ansågs ingen naturlig grundvattenbildning

ske. Detta gjordes till följd av att området till så stor del är täckt av postglacial lera, vilken antogs ha en grundvattenbildning på 0 mm/år.

#### **4.5.3 Hydraulisk konduktivitet**

Lerlagret gavs en hydraulisk konduktivitet på  $10^{-11}$ - $10^{-9}$  m/s och lagret med berggrund 0 m/s. Det genomsläppliga lagret gavs intervallet  $4,2 \cdot 10^{-4}$  –  $4,6 \cdot 10^{-2}$  m/s, då det efter en sammanvägd utvärdering av de skattade värdena ansågs vara det mest rimliga.

## 5 DISKUSSION

Då de osäkerheter som relateras till de i den konceptuella modellen ingående parametrarna redan har diskuterats utförligt i avsnitt 4.3, kommer denna diskussion att fokusera på situationen kring den tillgängliga litteraturen och tillgängligt material, på osäkerheter kring de valda beräkningsmetoderna och variationen i skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet, på den konceptuella modellen samt på hur de dokumenterade osäkerheterna kan minskas genom fortsatt arbete.

### 5.1 TILLGÄNGLIGT MATERIAL

Trots att litteraturstudien och informationssammanställningen främst fokuserade på området mellan Storvads grundvattentäkt och Galgbackens grundvattentäkt, resulterade den i en stor mängd material. Nyupptäckt material i form av fler rapporter, kartor och äldre data på grundvattennivåer, fortsatte även att tillkomma långt efter det att den inledande sammanställningen var klar. Vissa av dessa sent upptäckta dokument visade sig utgöra en viktig roll i arbetet, vilket orsakade att en stor mängd arbete fick läggas på att förbättra det som gjorts i brist på dessa dokument.

För att undvika att liknande situationer uppstår i det av Uppsala vatten nu uppstartade projektet Funktionsanalys Uppsalaåsen, är det av stor betydelse att den kunskap som finns om vilket material som är tillgängligt sammanställs centralt, istället för att som idag vara uppdelad mellan ett antal personer.

### 5.2 VARIATIONER I SKATTNING AV DEN INTEGRERADE HYDRAULISKA KONDUKTIVITETEN

De presenterade resultaten visar tydligt att variationen i den skattade integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten till följd av osäkerheter är stor. Detta syns tydligt genom skillnader i de olika intervallens storlek (tabell 17). Då osäkerheterna visade sig härröra främst från avsaknad av detaljer i tillgänglig jordlagerdata samt från brister i information om verklig kornstorleksfördelning, var det väntat att de beräkningar som baserades på lagerföljdsbeskrivningarna skulle resultera i störst variation.

**Tabell 17** Variation i skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet utifrån de tre beräkningsmetoderna.

<b>Beräkningen baseras på</b>	<b>Variation i <math>K_{int,H}</math> (m/s)</b>
Jordlagerföljdsbeskrivningar	$10^{-11}$ - 1
Siktanalyser	$4,2 \cdot 10^{-4}$ - $4,6 \cdot 10^{-2}$
Grundvattenföring och hydraulisk gradient	$1,1 \cdot 10^{-3}$ - $9,7 \cdot 10^{-3}$

De framtagna intervallen bör dock inte jämföras rakt av utan att det tas i beaktande att beräkningarna utförda på siktanalyser samt på grundvattenföring och hydraulisk gradient är baserade på ett mindre underlag än de utförda på lagerföljdsbeskrivningar. För att riktigt kunna avgöra vilket intervall som är mest rimligt bör beräkningarna baseras på underlag av liknande storlek.

Viktigt är också att notera att det inte säkert går att säga något om hur variationen av skattat  $K_{int,H}$  påverkas, då beräkningarna inte har jämförts med uppmätta värden på åsens verkliga hydrauliska konduktivitet. Detta är dock något som troligtvis endast kommer vara möjligt att uppnå lokalt, då det skulle kräva en mycket stor mängd fältmätningar för att täcka in hela fokusområdet.

### 5.3 BERÄKNINGSMETODER

Valet av beräkningsmetoder syftade till att möjliggöra en så omfattande analys av den integrerade horisontella hydrauliska konduktivitetens variation som möjligt. Till följd av att de två huvudmetoderna var baserade på olika typer av indata och jämfördes med en tredje typ av data, var det även möjligt att erhålla en indikation på rimligheten hos de två skattningarna.

#### 5.3.1 Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på jordlagerföljdsbeskrivningar

Den metod som utarbetades för att utifrån lagerföljder beräkna en integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet för varje enskilt borrhål, baserades till störst del på att det endast var en kornfraktion som styrde. De för de olika beräkningsscenariona erhållna resultaten visar på att detta var en mycket grov förenkling som kraftigt påverkade både de beräknade minimumvärdena och de beräknade maximumvärdena. Förenklingen var dock inte endast negativ, då den ledde till att det gick att få en indikation på hur mycket en brist på detaljer i jordlagerdata kunde påverka variationen hos en skattad hydraulisk konduktivitet. Resultatet blev dock inte mer än en indikation, då det inte fanns några värden på lagerföljdernas verkliga hydrauliska konduktivitet att jämföra med.

Till skillnad från övriga jordarter låg inte endast en kornfraktion till grund för jordarterna sandigt grus och grusig sand. Detta berodde på att det i dessa fall fanns ett värde att tillgå från litteraturen. Dessa värden ansågs kunna leda till ett mer pålitligt resultat än det som skulle erhållas om endast sand respektive grus användes. Detta till följd av att dessa jordarter förekom i en stor del av de sammanställda jordlagren, samt till följd av att benämningarna *sandigt* och *grusig* ansågs ge för lite information om vilka underfraktioner de utgjorde i de olika lagren. Att sandigt grus och grusig sand, samt huvudfraktionernas respektive underfraktioner, inte delades upp i endast en kornfraktion bidrog dock troligtvis starkt till att minimummedelvärdet baserat på den finaste kornfraktionen och det baserat på alla kornfraktioner är i stort sett samma.

Den förenkling som kom till följd av att en stor del av beräkningarna baserades på endast en kornfraktion var dock inte alltid till följd av beräkningsmetoden. Det kan också finnas jordarter som endast är beskrivna med ett substantiv, trots att de kan innehålla fler kornfraktioner. Detta är både stenhjord och blockjord exempel på. Enligt klassificeringen ska de bestå av minst 40 viktprocent sten eller block, vilket betyder att det i samma jordprov kan finnas nästan 60 viktprocent av någon annan fraktion. Det antagande som i detta arbete gjordes att stenhjord och blockjord har en hydraulisk konduktivitet på 1 m/s är därmed med största sannolikhet en mycket grov överskattning. För att öka noggrannheten för bland annat dessa jordtyper hade det därmed varit nödvändigt att veta vad den resterande delen av lagret innehöll.

#### 5.3.2 Skattning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet baserat på siktanalyser

Ett sätt att få reda på vad till exempel en stenhjord innehåller förutom stenfraktionen är att använda sig av siktanalyser. Trots att stenhjord inte ingick i någon av de 28 lagerföljder som i detta arbete hade dokumenterade siktanalyser, gav siktinformationen ändå värdefull information angående jordarternas sammansättning. Det var bland annat till följd av den ökade detaljgraden som beräkningarna utifrån siktanalyserna låg till grund för det intervall som valdes som mest rimligt för fokusområdet. Detta då denna var den starkaste kopplingen till jordarternas verkliga sammansättning som var möjligt att hitta i det sammanställda materialet.

### **5.3.3 Överslagsberäkning av hydraulisk konduktivitet baserad på grundvattenföring och hydraulisk gradient**

Då beräkningarna baserade på grundvattenföring och hydraulisk gradient fordrade att värden på många olika parametrar fanns, krävdes det att ett antal antaganden gjordes. Ett av dessa var att det beräknade värdet på den totala grundvattenbildning som sker norr om Storvad utgick från att lika stor grundvattenbildning skedde över hela området. En betydande del av grundvattenakviferen norr om Storvad är täckt med lera, vilket gör att detta antagande troligtvis ledde till att grundvattenbildningen från området överskattades. Denna möjliga överskattning kan dock ha kompenserats något av det antagande som gjordes att inget flöde kunde korsa varken den östra eller den västra sidan av grundvattenmagasinet. Det är inte troligt att detta antagande är korrekt, då Uppsalaåsen är en dränerande rullstensås.

Vidare visade analysen av de använda grundvattennivåerna att en betydande skillnad fanns mellan grundvattennivån i observationsrören 5201 och Galgbacken. Den exakta positionen av röret som benämns Galgbacken är dock tyvärr inte känd. Utan att veta observationsrörens exakta positioner i relation till grundvattenbrunnarna, är det trots allt tydligt att en märkbar avsänkning sker inom brunnområdet. Detta tyder på att den hydrauliska konduktiviteten i det omgivande materialet inte är så hög som några av de utifrån jordlagerföljderna beräknade värdena antydde. Innan observationsrörens placering i förhållande till grundvattenbrunnarna är kända kan dock inga större slutsatser dras om vilken av de använda sträckorna och den därtill kopplade hydrauliska konduktiviteten som bör användas.

### **5.4 DEN KONCEPTUELLA MODELLEN**

Den konceptuella modellen gjordes mycket enkel. Istället för att specificera uttagsmängd för varje brunn och infiltrationsmängd för varje bassäng, generaliserades såväl uttag som intag. Trots att detta inte nämnvärt borde påverka resultatet i simuleringar i en enklare matematisk modell, kan det påverka resultatet i en mer avancerad modell.

Indelningen av jordarter i endast ett lågpermeabelt och ett genomsläppligt lager är även det något som skulle kunna påverka en mer avancerad matematisk modell negativt. Detta eftersom det är en mycket grov generalisering, vilken med stor sannolikhet skulle försumma viktiga variationer i åsmaterialets genomsläpplighet. Då vissa rekognosceringsborrningar uppvisar uppemot tio lager med grus och sand om vartannat, skulle det dock inte vara möjligt att utföra en korrekt interpolation av dessa lagerföljder. Det kommer därmed alltid vara nödvändigt att generalisera lagerföljderna något, men för en bättre modellfunktion skulle detta göras med användning av fler lager än ett.

### **5.5 DEN SKATTADE VARIATIONENS PÅVERKAN PÅ TRANSPORTTIDEN**

Det stora spannet i skattad integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet visade sig leda till stora skillnader för den simulerade transporttiden. Den på 50-talet uppmätta grundvattenhastigheten på 7,5 m/dygn (Bergström, 1986) ger för sträckan Tunåsen till Galgbacken en transporttid på 279 dagar, vilket är ungefär 9,3 månader (avsnitt 4.1.3). De simulerade transporttiderna resulterade för samma sträcka i ett spann på 2 dagar till 7,7 månader. Sträckan mellan Tunåsen och Storvad uppvisade i sin tur ett spann på 1 till 10 månader.

Trots att det inte är de faktiska värdena som är av intresse i de utförda simuleringarna, ger de en indikation på hur transporttiden påverkas av variationer i den skattade integrerade horisontella hydrauliska konduktiviteten. En transporttid på två dagar mellan Tunåsen och Galgbacken är inte rimlig, samtidigt som det är orimligt att

det skulle ta tio månader för det infiltrerade vattnet att nå Storvads grundvattentäkt knappt 1500 m från Tunåsen. Detta indikerar att osäkerheterna i den befintliga informationen till stor grad kan påverka en simulerad transporttid. Samtidigt indikerar det att de använda beräkningsmetoderna bör ses över och då främst med fokus på den hydrauliska konduktivitet som kopplas till olika kornstorlekar.

## 5.6 DISKUSSION KRING FORTSATT ARBETE

Grunden till en välutvecklad och fungerande modell består av såväl god kännedom om det område som ska modelleras som av indata av hög kvalitet. Trots att litteraturstudien resulterade i en stor mängd information, var informationen varken heltäckande för området eller av genomgående god kvalitet. Istället var den i många avseenden bristfällig. I Uppsala vattens projekt Funktionsanalys Uppsalaåsen är tanken att hela Uppsalaåsen och Vattholmaåsen ska modelleras. Med tanke på hur mycket osäkerhet som är relaterad till fokusområdet, vilket endast utgör en bråkdel av de två åsarna, är det oerhört viktigt att mycket arbete läggs på att i största möjliga mån reducera de kända osäkerheterna.

En jämförelse av resultaten från lagerföljdsberäkningarna och siktanalysberäkningarna för de jämförbara lagerföljderna indikerar att siktanalyser inte alltid ger ett från jordartsbeskrivningarna alltför avvikande resultat (tabell 18).

**Tabell 18** Jämförelse mellan värden beräknade utifrån siktanalyser och medianvärden beräknade på värden baserade på lagerföljdsbeskrivningar. Siffrorna anger kvoten mellan respektive två värden.

<b>Borrhål</b>	<b>Kvot mellan siktanalys och jordlagerbeskrivning</b>
5202	0,0014
5204	0,0063
5206	0,011
5208	0,012
5905	0,23
5909	1,41
5913	1,94

Då det i Uppsala vattens projekt Funktionsanalys Uppsalaåsen rör sig om mycket stora områden och volymer att undersöka, skulle det därför troligtvis vara varken tidsmässigt eller ekonomiskt försvarbart att utföra siktanalyser i någon större utsträckning på de eventuella rekognosceringsborrningar som görs.

Istället för siktanalyser finns ett antal andra möjliga alternativ. Ett av dessa, vilket i större skala skulle kunna ge en bättre uppfattning om den hydrauliska konduktiviteten i åsen, är att utföra provpumpningar. Detta skulle även ge en verklig indikation på variationen i åsens hydrauliska konduktivitet. Baserat på provpumpningar kan transmissiviteten, vilket är den sammanlagda genomsläppligheten för hela jordprofilens mäktighet, beräknas. Genom att dividera transmissiviteten med mäktigheten erhålls därefter konduktiviteten.

Något som liknande provpumpningar skulle kunna ge en generell uppfattning om åsens hydrauliska konduktivitet är att utföra fler överslagsberäkningar baserade på grundvattenföring och hydraulisk konduktivitet. För att dessa ska vara av större betydelse skulle det dock vara nödvändigt med fler grundvattenmätningar gjorda i observationsrör som inte till lika stor grad är påverkade av pumpning. Utöver att utöka infrastrukturen med observationsrör på behörigt avstånd från grundvattenbrunnar, skulle det även vara värdefullt att rent generellt utöka antalet observationsrör där

grundvattenmätningar kan göras. Detta eftersom de befintliga rören liksom de upprättade lagerföljderna ofta är separerade av stora avstånd.

För att minska osäkerheten kring jordlagerföljderna och därmed kring såväl berggrundens läge som kring lagerföljdernas faktiska utseende skulle fler rekognosceringsborrningar kunna utföras. Förslaget är att dessa i så fall skulle fokuseras till områden med tidigare sparsam rumslig täckning och där sonderingar inte är ett lämpligt alternativ. Då det i fokusområdet endast gjorts ett mycket litet antal sonderingar, vilka alla låg i områdets utkant, anses det inte nödvändigt att kontrollera just dessa lagerföljder med hjälp av borrningar. I övriga delar av åsen kan det, utifrån de specifika förutsättningarna där sonderingen gjorts, fortfarande vara ett alternativ värt att överväga.



## 6 SLUTSATS

Utifrån de resultat som erhöles från dokumenteringen av osäkrheter och skattningen av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet mellan Tunåsens infiltrationsanläggning och Storvads och Galgbackens grundvattentäkter kunde följande slutsatser dras:

- Det finns i dagsläget betydande osäkrheter i det tillgängliga materialet kring Uppsalaåsen. Dessa är främst relaterade till kvaliteten och upplösningen på beskrivningen av jordlagerföljder och avsaknaden av data i stora områden.
- De omfattande osäkrheterna relaterade till befintlig jordlagerdata leder till en stor variation i åsens skattade integrerade horisontella hydrauliska konduktivitet.
- Indikationer finns på att det är möjligt att minska osäkrheterna och därmed begränsa den skattade variationen genom att använda mer detaljerad information i form av till exempel verkliga kornstorleksfördelningar.
- Den verkliga variabiliteten kan uppskattas från befintliga data. Osäkrheten i en sådan skattning är dock mycket stor och skulle kunna minskas genom nya, noggrannare bestämningar av K.

### 6.1 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

För att reducera mängden osäkrheter i det framtida arbetet med Uppsalaåsen och Vattholmaåsen föreslås följande åtgärder:

- Samla den idag tillgängliga informationen centralt och komplettera med bland annat uppgifter om på vilket djup grundvattenbrunnarna är belägna.
- Utför provpumpningar för att genom mätningar av transmissiviteten erhålla information om åsens verkliga hydrauliska konduktivitet.
- Utöka det antal punkter i vilka grundvattennivåmätningar görs, med fokus på områden som inte är påverkade av grundvattenuttag.
- Komplettera de idag kända lagerföljderna med nya rekognosceringsborringar eller sonderingar.

## 7 REFERENSER

### 7.1 PUBLICERAT MATERIAL

- AB Isotopteknik, 1974. *Spårämnesundersökning av grundvattenströmning i Uppsala; etapp 3, delrapport 2*. Stockholm: Aktiebolaget Isotopteknik.
- Ahlgren, S., Bergström, R. B., & Pousette, J., 1992. Uppsala aquifer – Sweden. I *Geology and the Environment in Western Europe – A coordinate statement by the Western European Geological Surveys*, Lumsden, G. I., (red.), s. 40-43. Oxford: Clarendon Press.
- Anderson, M.P., & Woessner, W.W., 2002. *Applied groundwater modeling – Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press.
- Benn, D. I., & Evans, D. J. A., 2010. *Glacier and glaciation*, 2<sup>nd</sup> edition. England: Hodder Education.
- Bergström, R.B., 1986. *Uppsalaåsen och Vattholmaåsen. En hydrogeologisk undersökning av delen Galgbacken – Svista/Fullerö*. QUFO 1986:1. Societas Upsaliensis pro Geologia Quaternaria, Uppsala.
- Bouwer, H., 1978. *Groundwater hydrology*. USA: McGraw-Hill.
- Domenico, P.A., & Schwartz, F.W., 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2. ed. New York: John Wiley and Sons.
- Eriksson, J., Nilsson, I., & Simonsson, M., 2005. *Wiklanders marklära*. Lund: Studentlitteratur.
- Espeby, B. & Gustafsson, J. P., 1998. *Vatten och ämnestransport i den omättade zonen*. TRITA-AMI Rapport 3038, Avdelningen för mark- och vattenresurser, institutionen för anläggning och miljö. Kungliga Tekniska Högskolan. Tillgänglig på [http://www2.lwr.kth.se/Forskargrupper/EGC/Trita\\_Ami\\_3038.pdf](http://www2.lwr.kth.se/Forskargrupper/EGC/Trita_Ami_3038.pdf) (2013-11-13).
- Fagerström, H., & Wiesel, C-E., 1972. *Permeabilitet och kapillaritet – Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 8*. Byggnadsforskningens informationsblad B7:1972. Statens institution för byggnadsforskning, Stockholm. [Elektronisk version] Tillgänglig på [www.sgf.net/getfile.ashx?cid=81805&cc=3&refid=20](http://www.sgf.net/getfile.ashx?cid=81805&cc=3&refid=20) (2013-11-13).
- Franks, B.J., 1988. *Hydrogeology and flow of water in a sand and gravel aquifer contaminated by wood-preserving compounds, Pensacola, Florida*, USGS, Water Resources Investigations Report 87-4260, 72 s. [Elektronisk version] Tillgänglig på <http://pubs.usgs.gov/wri/1987/4260/report.pdf> (2013-09-12).
- Golder Associates, 1995. *Kompletterande modellberäkningar: Uppsala vattenförsörjning*, rapport 958-1205.

- Golder Geosystem AB, 1990. *Uppsala vattenförsörjning: Grundvattenmodell för Uppsalaåsen*, rapport 907-1206.
- Grip, H., & Rodhe, A., 1994. *Vattnets väg från regn till bäck*, 3., rev. upplagan. Stockholm: Hallgren & Fallgren Studieförlag AB.
- Hansson, G., 2000. *Konstgjord grundvattenbildning – 100-årig teknik inom svensk dricksvattenförsörjning*. VA-Forsk rapport nr 2000-05. Stockholm: Svenska vatten- och avloppsverksföreningen (VAV).
- Harbaugh, A.W., 2005. *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground Water Model – The Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*. Reston: U.S. Geological Survey. Tillgänglig på <http://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF.htm> (2013-09-04).
- Hendriks, M. R., 2010. *Introduction to physical hydrology*. Oxford: Oxford University Press.
- Karlsson, R., & Hansbo, S., 1984. *Jordarternas indelning och benämning, Geotekniska laboratorieanvisningar, del 2. 2.*, rev. upplagan. Svenska geotekniska föreningen. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. [Elektronisk version] Tillgänglig på [www.sgf.net/getfile.ashx?cid=81805&cc=3&refid=12](http://www.sgf.net/getfile.ashx?cid=81805&cc=3&refid=12) (2013-10-18).
- Knutsson, G., & Morfeldt, C.- O., 1993. *Grundvatten: teori och tillämpning*. Stockholm: Svensk byggtjänst.
- Lantmäteriet, 2013. *Koordinattransformation*. Tillgänglig på <https://www.lantmateriet.se/Sjalvservice/Koordinattransformation/> (2013-09-13).
- Larsson, R., 2008. *Jords egenskaper*. Information 1. Linköping: Statens geotekniska institut, Linköping. [Elektronisk version] Tillgänglig på <http://www.swedgeo.se/upload/publikationer/Info/pdf/SGI-I1.pdf> (2013-10-17).
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H., 1982. *Hydrology for engineers*. 3. ed. New York: McGraw-Hill.
- Livsmedelsverket, 2006. *Vägledning till Livsmedelsverkets föreskrifter (SLVFS 2001:30) om dricksvatten*. Tillgänglig på <http://www.slv.se/sv/grupp1/Dricksvatten/Foreskrifter-om-dricksvatten/> (2014-02-04).
- Lundin, S.-E., 1988. *Ingenjörsgelogisk karta över Uppsala*. Lic.avh., kvartärgeologiska avdelningen, Uppsala Universitet. Uppsala.

- Morosini, M., 1989. *The artificial recharge of Tunåsen, Uppsala: A hydrochemical consideration*. Lic., avh., kvartärgeologiska avdelningen, Uppsala universitet. Uppsala.
- Nationalencyklopedin, 2013. *Uppsalaåsen*. Tillgänglig på <http://www.ne.se/lang/upsalaasen> (2013-12-10).
- Norra Östersjöns Vattendistrikt, 2008. *Kartlägningsrapport för Norra Östersjöns vattendistrikt – preliminär bedömning av tillståndet i våra vatten*. Tillgänglig på <http://www.vattenmyndigheterna.se/SiteCollectionDocuments/sv/norra-ostersjon/publikationer/KoA2008/kartlaggningsrapport-2008.pdf> (2013-09-16).
- Odong, J., 2008. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis, *The Journal of American Science*, 4(1). Tillgänglig på [http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/0401/01\\_0287\\_JustineOdong\\_Evaluation\\_am0401.pdf](http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/0401/01_0287_JustineOdong_Evaluation_am0401.pdf) (2014-01-26).
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., & Pers, C., 2006. *Grundvattenbildning i svenska typjordar: översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell*. Report series A, No. 66. Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära. Tillgänglig på [www.sgu.se/dokument/fou\\_extern/Rodhe-et-al.pdf](http://www.sgu.se/dokument/fou_extern/Rodhe-et-al.pdf) (2013-11-22).
- Sidenvall, J., 1970. *Grundvatten i Uppsalatrakten*. Lic. avh, kvartärgeologiska institutionen, Uppsala universitet. Uppsala.
- Sidenvall, J., 1977a. Tracer tests in ground water. *Striae*, Vol. 4, s.61-63, ISBN 91 7388-003-5. ISSN 0345-0074. Uppsala: Gatukontoret.
- Sidenvall, J., 1977b. *Support paper G: Tracer tests in groundwater*.
- Sjögren, B., 1984. *Shallow Refraction Seismics*. London: Chapman and Hall
- Sundlöf, B. & Kronqvist, L., 1992. *Konstgjord grundvattenbildning: Nulägesbeskrivning av tjugo svenska anläggningar*. VA-Forsk rapport nr 1992-13. Stockholm: Svenska vatten- och avloppsverksföreningen (VAV).
- SGF, 2005. *Permeabilitetsbestämning genom laborieförsök*, SGF Notat 2:2005. SGF:s Laboratiekommitté. Linköping: Svenska geotekniska föreningen. Tillgänglig på [www.sgf.net/getfile.ashx?cid=cc3refid3](http://www.sgf.net/getfile.ashx?cid=cc3refid3) (2013-10-18).
- SGU, 2009. *Sveriges grundvattentillgångar: Betydelse för näringslivsutveckling och tillväxt*. Dnr 0-1745/2008. Tillgänglig på [http://www.sgu.se/dokument/service\\_sgu\\_publ/utredning\\_sveriges-grundvattentillgangar.pdf](http://www.sgu.se/dokument/service_sgu_publ/utredning_sveriges-grundvattentillgangar.pdf) (2013-11-28).
- SGU, 2013b. SGUs kartgenerator. Tillgänglig på [http://maps2.sgu.se/kartgenerator/maporder\\_sv.html](http://maps2.sgu.se/kartgenerator/maporder_sv.html) (2013-12-10).
- SGU, 2013d. SGUs brunnsarkiv. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning.

- SWECO, 2008. *Tillståndsansökan Lersätter: Komplettering, bilaga 5: Angående geologisk barriär*. Tillgänglig på <http://www.kil.se/upload/Kils%20Avfallshantering/Samr%C3%A5d%20tillst%C3%A5nd/Bilaga%205%20PM%20ang%C3%A5ende%20geologisk%20barri%C3%A4r.pdf> (2013-11-13).
- Terwindt, J.H.J, & Augustinus, P.G.E.F., 1985. Lateral and longitudinal successions in sedimentary structures in the middle Mause esker, Scotland. *Sedimentary Geology*, 45(1985), 161-188. Tillgänglig på <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.its.uu.se/science/article/pii/0037073885900016> (2014-02-04).
- Tunemar, L., Whitlock, H., Nicolaisen, M., Lindblad, A., Lång L.-O., & Vesslen, A., 2009. *Lägesrapport Vattentäcksarkivet (DGV) december 2008*. SGU-rapport 2009:12. Sveriges Geologiska undersökning. [Elektronisk version] Tillgänglig på [http://www.sgu.se/dokument/service\\_sgu\\_publ/SGU-rapport\\_2009-12.pdf](http://www.sgu.se/dokument/service_sgu_publ/SGU-rapport_2009-12.pdf) (2013-09-16).
- Uppsala kommun, 2005. *Övergång till RH2000-höjdsystemet i Uppsala kommun*. Uppsala: Stadsbyggnadskontoret.
- Uppsala vatten och avfall AB, u.å.a. *Profil över Uppsalaåsen vid Storvad, Gamla Uppsala samt plan över Storvad*, längdskala 1:1000 och höjdskala 1:100. Uppsala vatten och avfall ABs kartarkiv. Scanningsnummer 110559.
- Uppsala vatten och avfall AB, u.å.b. *Pumpad vattenmängd ur Uppsalaåsen*. Uppsala vatten och avfall ABs kartarkiv. Scanningsnummer 110582.
- Uppsala vatten och avfall AB, u.å.c. *Infiltrerad vattenmängd i Uppsalaåsen*. Uppsala vatten och avfall ABs kartarkiv. Scanningsnummer 110581.
- VBB, 1955. *Uppsala vattenförsörjning: PM angående utökning av vattentillgången samt redogörelse för hydrologiska undersökningar*. Stockholm: VBB.
- VBB, 1958. *Uppsala vattenförsörjning: Infiltration – Redogörelse för försöksinfiltration i Tunåsen år 1956*. Stockholm: VBB.
- VBB, 1959. *Uppsala vattenförsörjning: Infiltration – Redogörelse för Rekognosceringsborrningar utförda åren 1957-58*. Stockholm: VBB.
- VBB, 1960. *Uppsala vattenförsörjning: Infiltration – Redogörelse för rekognosceringsborrningar vid Galgbacken utförda år 1959*. Stockholm: VBB.
- VBB, 1979. *Uppsala vattenförsörjning: Matematisk modellstudie av Uppsalaåsen*. Stockholm: VBB.
- VISS (2014). *Uppsalaåsen-Uppsala*. Tillgänglig på <http://www.viss.lansstyrelsen.se/Waters.aspx?waterEUID=SE664296-160193> (2014-01-20).

Wällberg, B., & Wikner, T., 1993. *Seismiska undersökningar vid Storvad, Uppsala kommun*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.

## **7.2 PERSONLIG KOMMUNIKATION**

Ahlgren, Sven. Avdelningschef, Uppsala vatten och avfall AB, 10 december 2013

McCleaf, Philip. Processingenjör, Uppsala vatten och avfall AB, 6 februari 2014

Paptchikhine, Alexej, styr/reglering, Uppsala vatten och avfall AB, 29 oktober 2013

Thorsbrink, Magdalena. SGU, 29 november 2013

Wiberg, Björn. SGU Jord och berg, 29 oktober 2013

Wertsberg, Karin. Utredningsingenjör, Uppsala vatten och avfall AB, 7 november 2013

## **7.3 KARTOR**

*Alla kartor från Lantmäteriet är hämtade i digitalt format från <https://maps.slu.se/get/>, medgivande i2012/921.*

Lantmäteriet (2013). Lantmäteriets fasighetskarta i vektorform, skala 1:5 000 - 1:20 000.

Lantmäteriet (2013). Lantmäteriets ortofoto i rasterform, 1 m noggrannhet.

Lantmäteriet (2013). Lantmäteriets terrängkarta i vektorform.

Lantmäteriet (2013). Lantmäteriets tätortskarta i rasterform. Skala 1:10 000.

Lantmäteriet (2013). Lantmäteriets översiktskarta i vektorform, skala 1:100 000 - 1:500 000.

SGU, 2013a. Jordartskarta 1:50 000, koordinater 635487, 6630414. Tillgänglig på [http://maps2.sgu.se/kartgenerator/maporder\\_sv.html](http://maps2.sgu.se/kartgenerator/maporder_sv.html) (2013-12-10).

SGU, 2013c. Grundvattenkartan över Uppsala i digitalt format. Erhållen från SGU genom Uppsala vatten och avfall AB.

## BILAGOR

### BILAGA A – MATERIALINDEX

<b>Material</b>	<b>Index</b>
Grus	1
Fingrus	2
Grovt grus*	3
Sand	4
Finsand/grovmo	5
Mellansand	6
Grovsand	7
Lera	8
Berg	9
Stenmaterial	10
Mjäla	11
Sandblandat/sandigt	12
Grusblandat/grusigt	13
Stenigt	14
Sten/med sten	15
Lerigt/lerblandat	16
Jordblandad/humusblandad	17
Mjälligt	18
Moigt	19
Stenjord	20
Sten, block eller berg	21
Morän	22
Matjord	23
Blockjord	24
Finmo	25
Fyllning	26
Friktionsmaterial	27
Sten eller block	28
Rullsten	29
Jordmaterial ej upptaget/inget prov	30
Stenig morän	31
Grusig morän	32

\* Enligt den äldre beteckningen, det vill säga en kornstorlek på 6-20 mm istället för dagens 20-60 mm.

## BILAGA B – GEOREFERERING AV UTFÖRDA REKOGNOSKERINGSBORRNINGAR

### 1) Området Läby – Ekoln

Använd karta [filnamn]: LäbyEkoln.png, skala 1:50 000

Anpassad till i Photoshop: Lantmäteriets översiktskarta

Namn efter anpassning: LäbyEkoln\_inpassad.png

Georefererad mot: Lantmäteriets översiktskarta

Vid georefereringen användes 10 kända punkter (tabell 19).

**Tabell 19** Punkter använda i georefereringen av området Läby-Ekoln. Alla koordinater är i SWEREF99 TM.

<b>Punktnamn</b>	<b>Anmärkning</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
Läby	•	6664410	642624
Skyttorp	48 • (i punkten)	6664177	653024
Ängeby	Ä: högra pricken i Ä	6652578	653499
Danmark kyrka	I ”korsningen” i korset	6636094	654163
Högby	15 • (i punkten)	6631675	642812
Åkerby kyrka	I ”korsningen” i korset	6645675	639287
Bälinge kyrka	I ”korsningen” i korset	6648182	641317
Ärentuna kyrka	I ”korsningen” i korset	6649377	645740
7316	Mitt i borrhålet	6643286	646844
5204	Mitt i borrhålet	6642613	646593

Totalt antal punkter: 10 st.

### 2) Galgbacken

Använd karta [filnamn]: Galgbacken\_tvärsnitt.png

Anpassad till i Photoshop: Lantmäteriets tätortskarta

Namn efter anpassning: Galgbacken\_inpassad.png

Georefererad mot: Lantmäteriets tätortskarta

Vid georefereringen användes 5 kända punkter (tabell 20).

**Tabell 20** Punkter använda i georefereringen av Galgbacken. Alla koordinater är i SWEREF99 TM.

<b>Punktnamn</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
Galgbacksv/Svartbäcksg	6640593	646868
Folkungagatan, nedre vänstra hörnet	6640246	646698
Swedenborgsg/Ynglingagatan	6640738	647109
Anundsgatan/Hallstensgatan	6640277	647409
Styrbjörnsgratan/Eglisgatan	6640369	647029

Totalt antal punkter: 5 st.

Från Photoshop sparades kartan i form av ett separat lager, istället för att sättas ihop med tätortskartan. Detta eftersom det ansågs finnas gott om tydliga georefereringspunkter utan att lagret behövde sättas ihop med en tydligare karta.



### **3) Området Drälinge-Lövstalöt**

Använd karta [filnamn]: DrälingeLövstalöt.png

Anpassad till i Photoshop: Lantmäteriets terrängkarta

Namn efter anpassning: DrälingeLövstalöt\_inpassad.png

Georefererad mot: Lantmäteriets terrängkarta

Vid georefereringen användes 7 kända punkter (tabell 21).

**Tabell 21** Punkter använda i georefereringen av området Drälinge-Lövstalöt. Alla koordinater är i SWEREF99 TM.

<b>Punktnamn</b>	<b>Anmärkning</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
Lyckan	Mitt i vit fyrkant	6655234	640482
Gränby	•	6655282	642413
Juvansbo	Mitt i vit fyrkant	6654953	644790
”Präs” kyrka	I ”korsningen” i korset	6649325	645550
Åloppe	Å: mitt i ringen	6649036	639815
Dragby	Mitt i vit fyrkant	6652484	642794
Högsta	Mitt i vit fyrkant	6651312	643225

Totalt antal punkter: 7 st.

### **4) Området Faxan-Galgbacken**

Använd karta [filnamn]: FaxanGalgbacken.png

Anpassad till i Photoshop: Lantmäteriets terrängkarta

Namn efter anpassning: FaxanGalgbacken\_inpassad.png

Georefererad mot: Lantmäteriets terrängkarta

Vid georefereringen användes 6 kända punkter (tabell 22).

**Tabell 22** Punkter använda i georefereringen av området Faxan-Galgbacken. Alla koordinater är i SWEREF99 TM.

<b>Punktnamn</b>	<b>Anmärkning</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
Ärna gård	•	6643769	645925
28	•	6644123	648097
5204	Mitt i borrhålet	6642613	646593
Hus nere till vänster	Svart, kvadratisk	6641546	645949
Hus nere till höger	Kvadratisk, bredvid avlångt	6640582	648408
5203	Mitt i borrhålet	6642436	646795

Totalt antal punkter: 6 st.

## **5) Tunåsen**

*Använd karta [filnamn]:* Tunåsen\_sammansatt\_v2.png

*Anpassad till i Photoshop:* -

*Namn efter anpassning:* -

*Georefererad mot:* Lantmäteriets fastighetskarta och Lantmäteriets terrängkarta (för en punkt på en höjdlinje)

Vid georefereringen användes 8 kända punkter (tabell 23).

**Tabell 23** Punkter använda i georefereringen av Tunåsen. Alla koordinater är i SWEREF99 TM.

<b>Punkt</b>	<b>Anmärkning</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
5204	Mitt i borrhålet	6642613	646593
Hus övre hö. hörnet	Fyrkantigt, nedre högra hörnet använt	6642720	646597
Hus övre hö. hörnet	Avlångt, nedre vänstra hörnet använt	6642700	646606
Hus nedre vä. hörnet	Nedre högra hörnet	6642335	646485
5702	Mitt i borrhålet	6642583	646593
Höjdkurva	Tredje från ovan	6642753	646737
Hus, fyrkantigt på gård med tre småhus	Övre högre hörnet	6642593	646548
Litet hus på gård med tre hus	Övre högre hörnet	6642589	646457

Totalt antal punkter: 8 st.

Anmärkning: Försök till anpassning i Photoshop gjordes, men lyckades inte på grund av för få punkter att anpassa mot. Istället georefererades kartan direkt.

Försök att använda 5703 gjordes, men då blev resultatet mycket konstigt. Efter kontroll av alla använda punkter, upptäcktes att borrhål 5703 låg ca 800 m söder om borrhål 5204. Enligt den karta där de båda finns på ska det skilja 73 m. När 5703 uteslöts gick georefereringen någorlunda bra.

## **6) Storvad**

*Använd karta [filnamn]:* Storvad\_profil.png

*Anpassad till i Photoshop:* -

*Namn efter anpassning:* -

*Georefererad mot:* Lantmäteriets ortofoto över Storvad

Vid georefereringen användes 12 kända punkter (tabell 24).

**Tabell 24** Punkter använda i georefereringen av Storvad. Alla koordinater är i SWEREF99 TM.

<b>Punktnamn</b>	<b>N</b>	<b>E</b>
Grundvattenhuv 1	6643721	646894
Grundvattenhuv 2	6643724	646903
Grundvattenhuv 3	6643724	646917
Grundvattenhuv 4	6643722	646934
Grundvattenhuv 5	6643720	646951
Grundvattenhuv 6	6643719	646966
Grundvattenhuv 7	6643718	646982
Grundvattenhuv 8	6643717	646995
Grundvattenhuv 9	6643715	647009
Grundvattenhuv 10	6643714	647024
Grundvattenhuv 11	6643713	647043
Grundvattenhuv 12	6643711	647067

Totalt antal punkter: 12 st.

Anmärkning: Punkterna som användes i georefereringen begränsades till de 12 grundvattenhuvarna. Detta eftersom de fyra rekognosceringsborrningarna med okända koordinater var lokaliserade väldigt nära dessa samt att de ansågs vara de tydligaste punkterna. Anledningen till att ingen anpassning gjordes i Photoshop var för att den ritade kartan ansågs alltför svårpassad (dvs det fanns inte tillräckligt med punkter).

## BILAGA C – RESULTAT AV RIMLIGHETSANALYS

Parameter	Fråga					Totalt	Index
	1	2	3	4	5		
K <sub>lera,1</sub> <sup>(1,2,3)</sup>	4	4	0	0	0	8	5
K <sub>lera,2</sub> <sup>(4)</sup>	3	3	0	0	0	6	3
K <sub>lera,3</sub> <sup>(5)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>finmo,1</sub> <sup>(2,8)</sup>	4	4	0	0	0	8	5
K <sub>finmo,2</sub> <sup>(7)</sup>	3	3	0	0	0	6	3
K <sub>mjäla,1</sub> <sup>(2)</sup>	3	3	0	0	0	6	3
K <sub>mjäla,2</sub> <sup>(7)</sup>	3	3	0	0	0	6	3
K <sub>finsand,1</sub> <sup>(1,2)</sup>	4	4	0	0	0	8	5
K <sub>finsand,2</sub> <sup>(5)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>mellansand,1</sub> <sup>(1,2)</sup>	4	4	0	0	0	8	5
K <sub>mellansand,2</sub> <sup>(6)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>mellansand,3</sub> <sup>(5)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>grovсанд,1</sub> <sup>(1,2,3,7)</sup>	4	4	0	0	0	8	5
K <sub>grovсанд,2</sub> <sup>(4)</sup>	3	3	0	0	0	6	3
K <sub>grovсанд,3</sub> <sup>(5)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>grovсанд,4</sub> <sup>(6)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>fingrus,1</sub> <sup>(1,2,3,8)</sup>	4	4	0	0	0	8	5
K <sub>grus,1</sub> <sup>(4)</sup>	3	3	0	0	0	6	3
K <sub>grus,2</sub> <sup>(9)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>sand&amp;grus,1</sub> <sup>(6)</sup>	1	1	0	0	0	2	2
K <sub>sand&amp;grus,2</sub> <sup>(9)</sup>	1	1	0	0	0	2	2

### Indexering:

0-20%: Säkerhetsindex 1  
 21-40%: Säkerhetsindex 2  
 41-60%: Säkerhetsindex 3  
 61-80%: Säkerhetsindex 4  
 81-100%: Säkerhetsindex 5

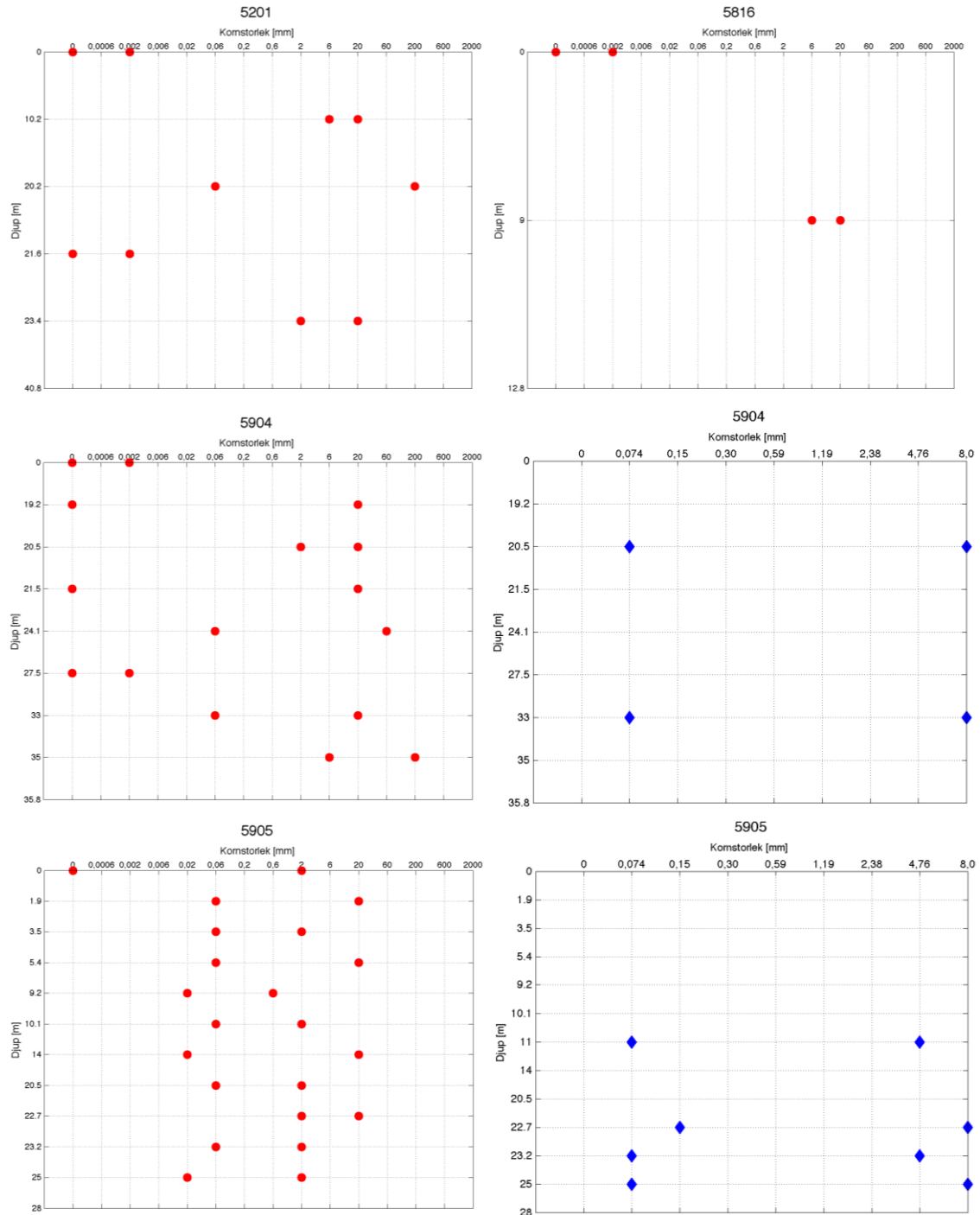
<sup>1)</sup> SGF, 2005, <sup>2)</sup> Fagerström & Wiesel, 1972, <sup>3)</sup> SWECO, 2008, <sup>4)</sup> Knutsson & Morfeldt, 1993,

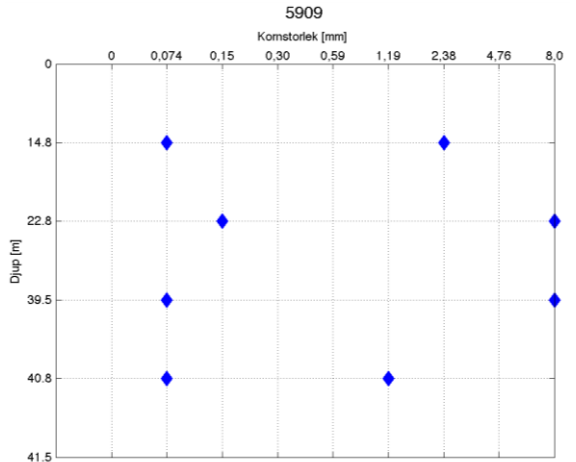
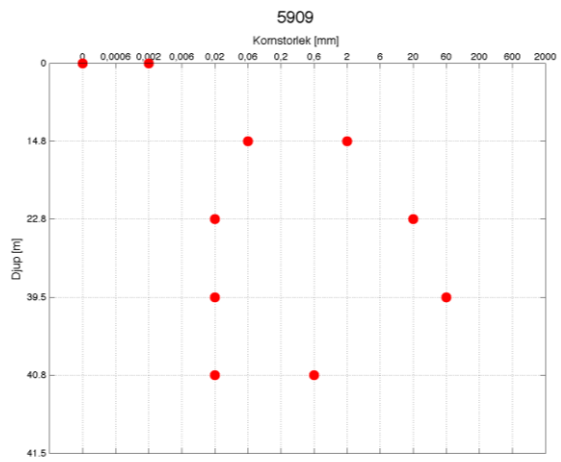
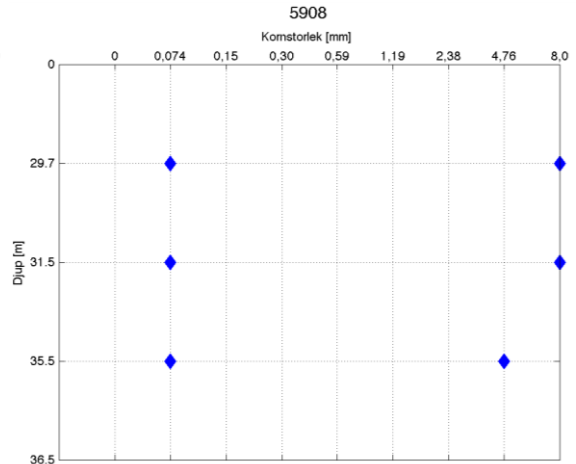
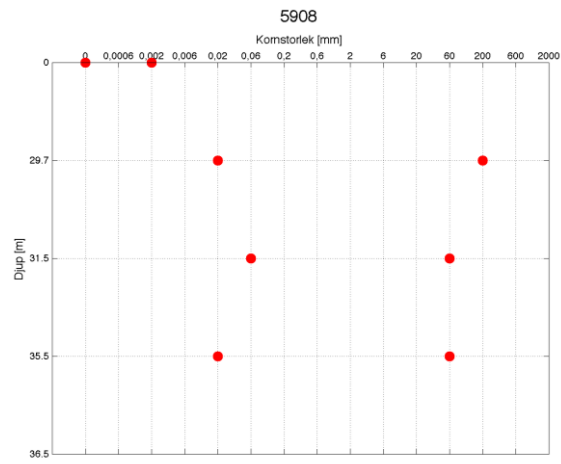
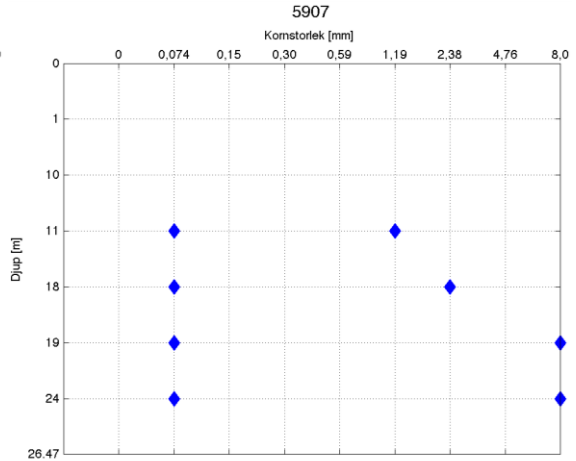
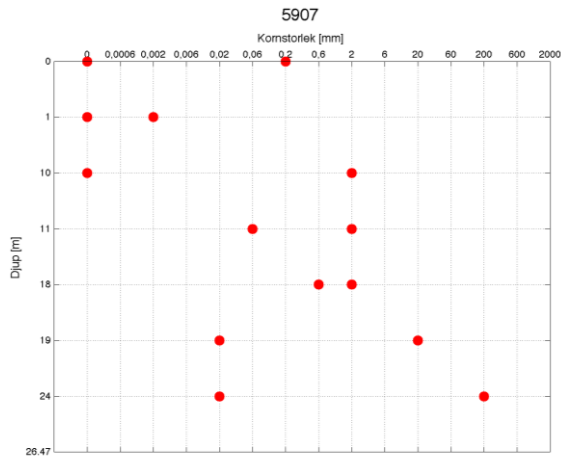
<sup>5)</sup> Domenico & Schwartz, 1998, <sup>6)</sup> Bouwer, 1978, <sup>7)</sup> Grip & Rodhe, 1994, <sup>8)</sup> Espeby & Gustafsson, 1998, <sup>9)</sup> Linsley, Kohler, Paulhus, 1982

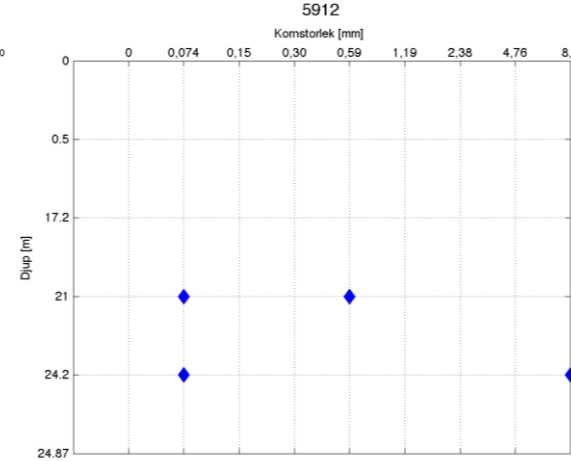
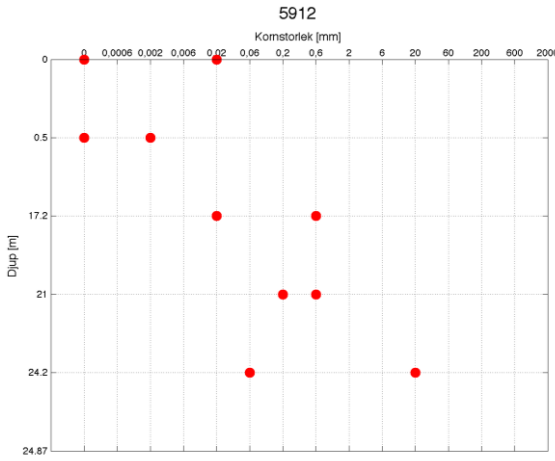
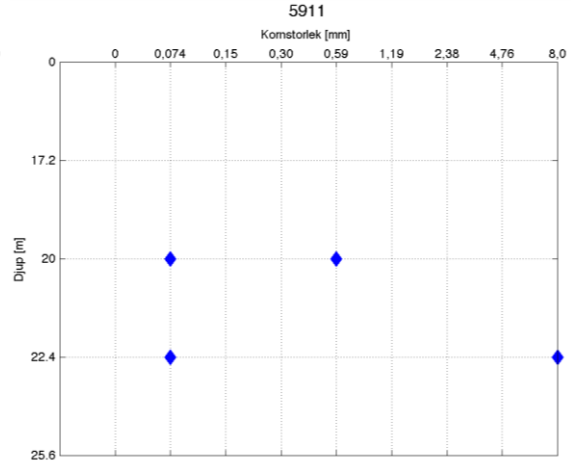
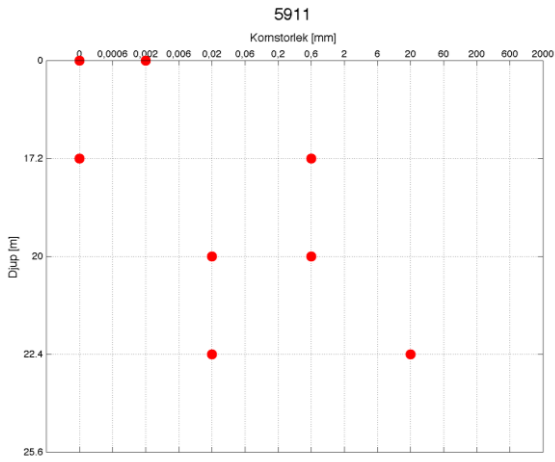
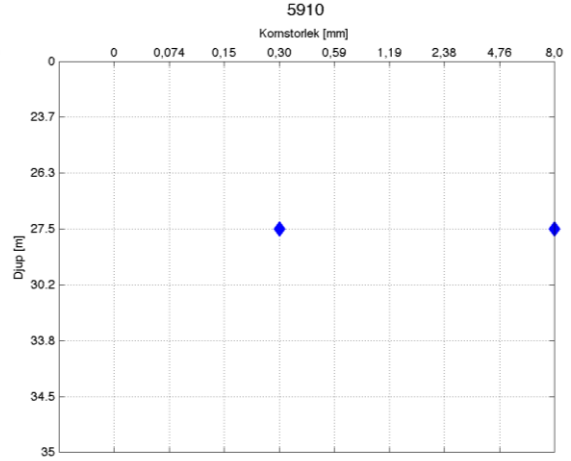
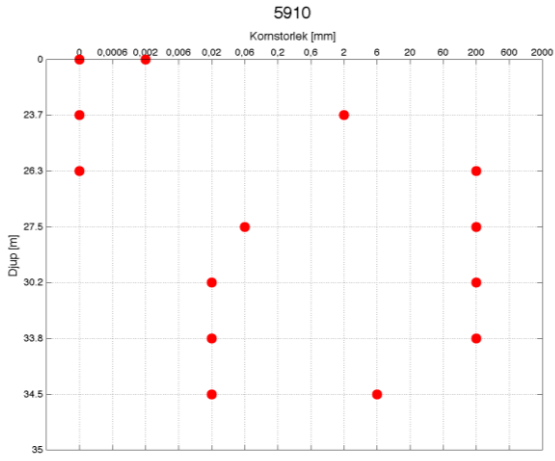
## BILAGA D – KORNSTORLEKSFÖRDELNINGAR

Uppskattade kornstorleksfördelningar för varje lagerföljd. Diagram med röda markeringar baseras på lagerföljdsbeskrivningar och diagram med blå markeringar på siktanalyser. Minsta och största kornstorleksfördelning för respektive lager markeras på den linje som anger den övre gränsen för lagret.

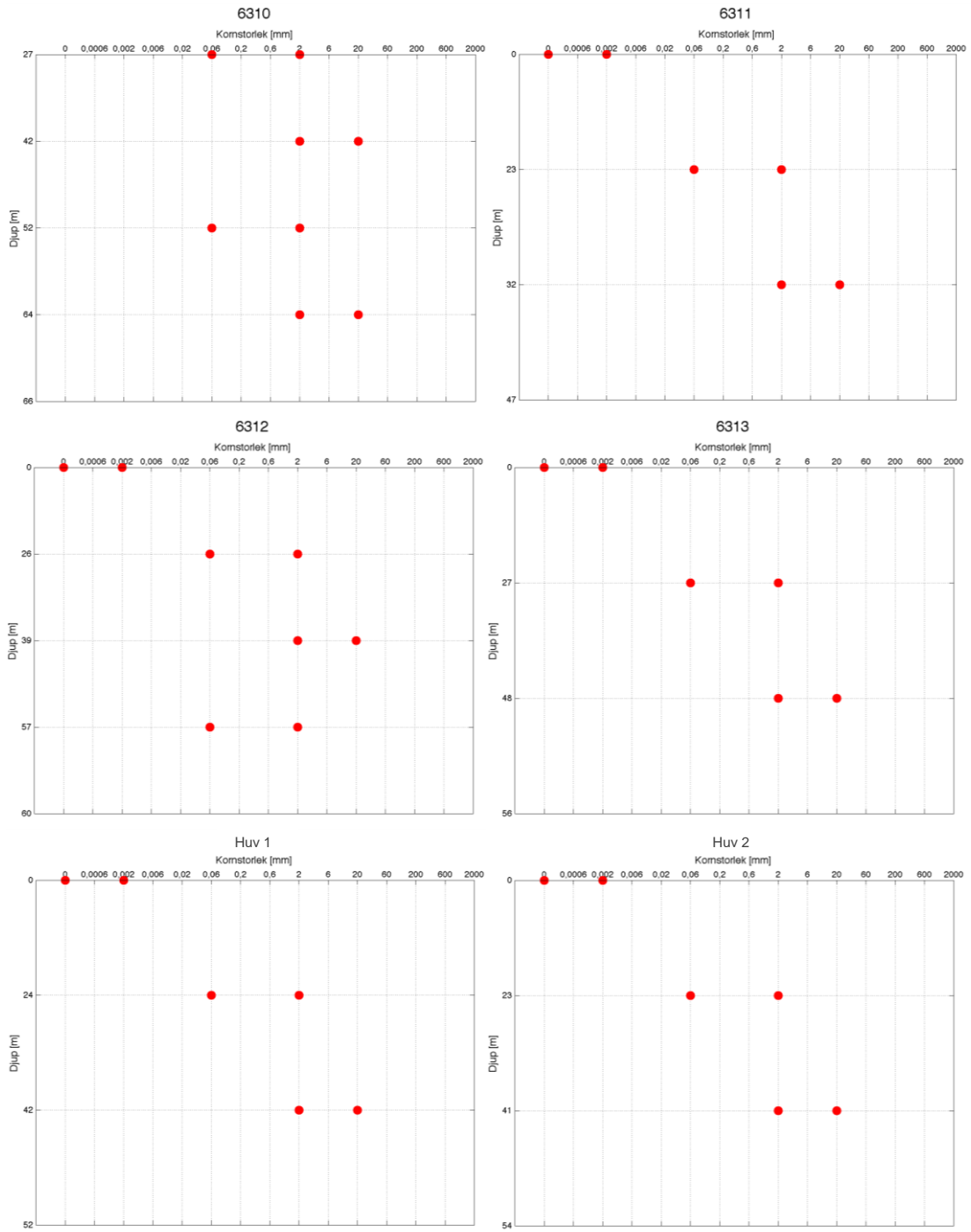
### GALGBACKEN



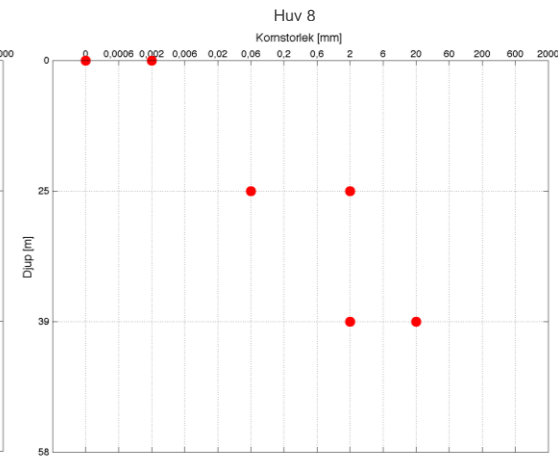
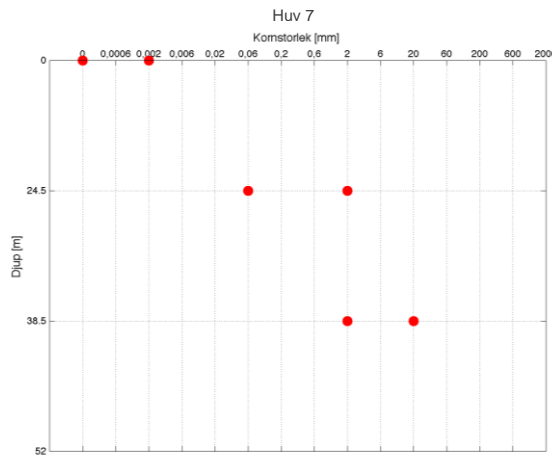
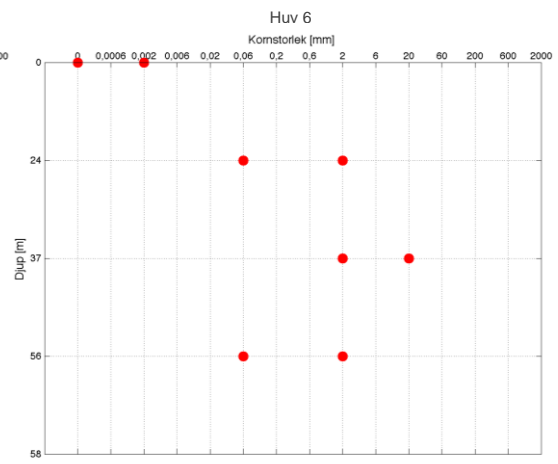
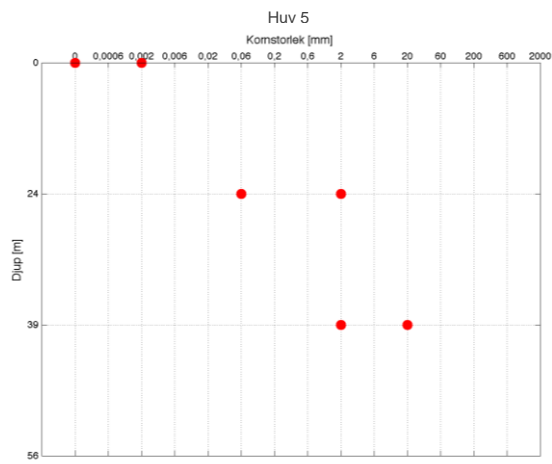
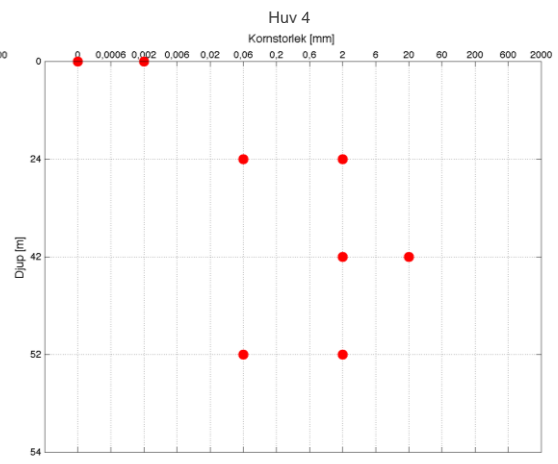
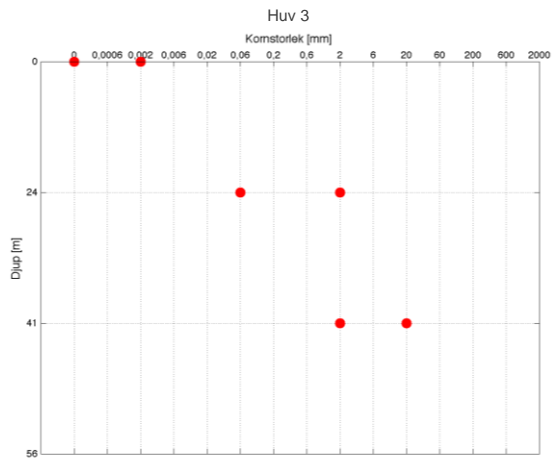


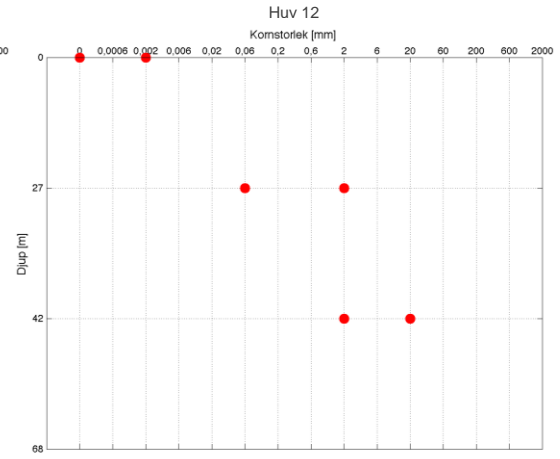
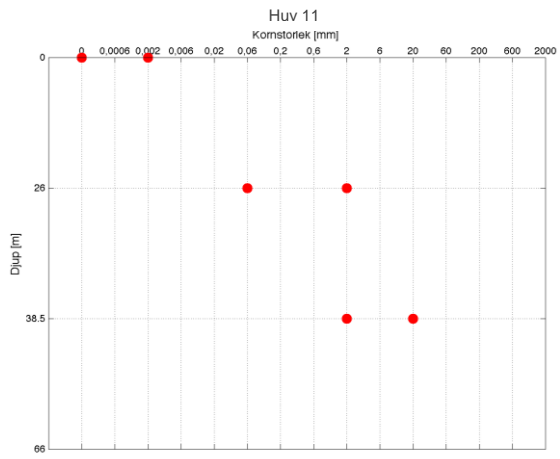
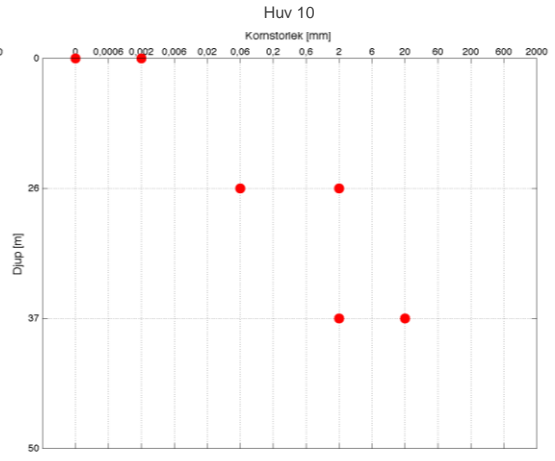
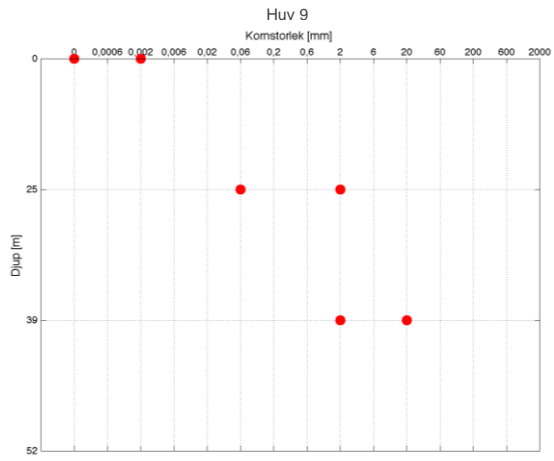


# STORVAD

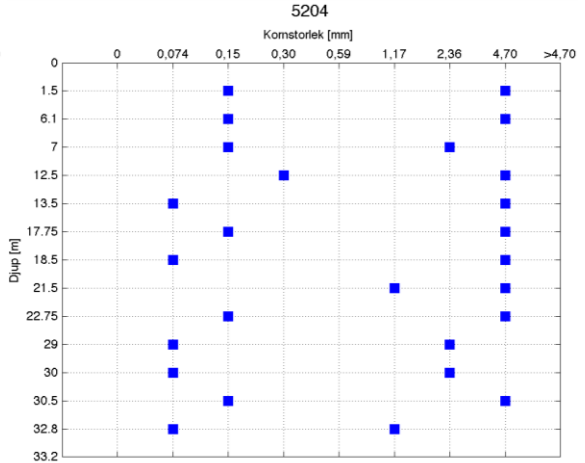
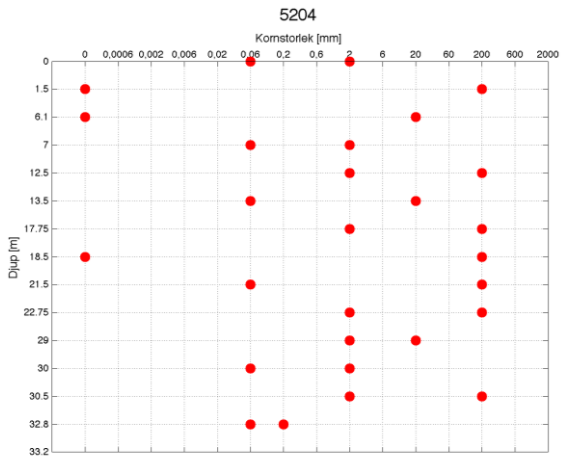
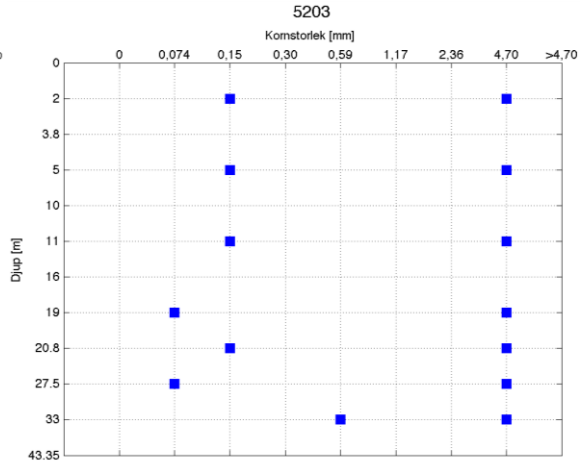
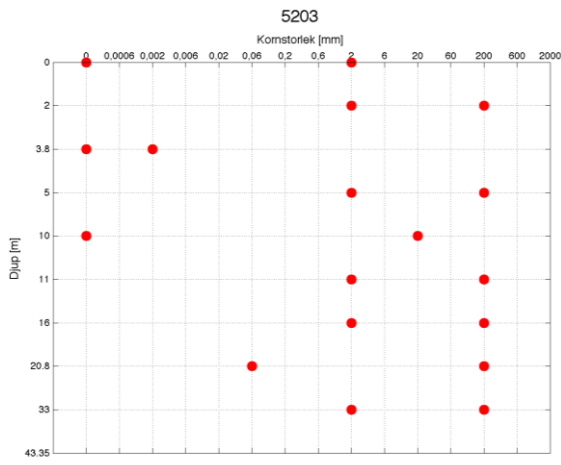
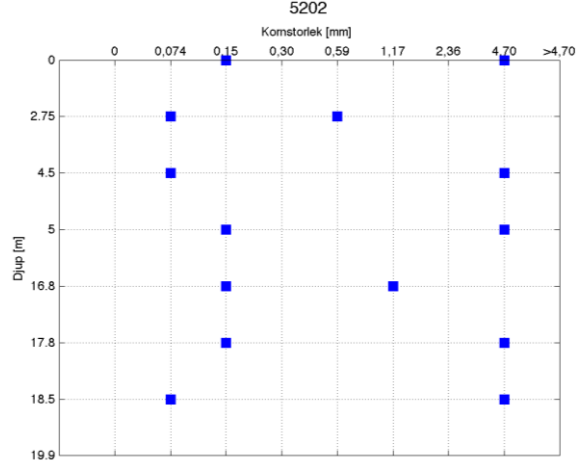
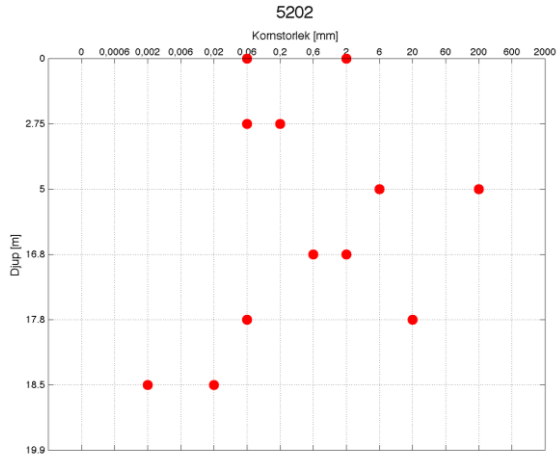


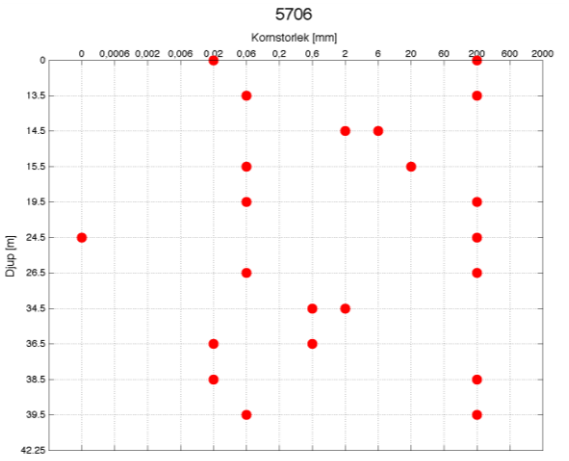
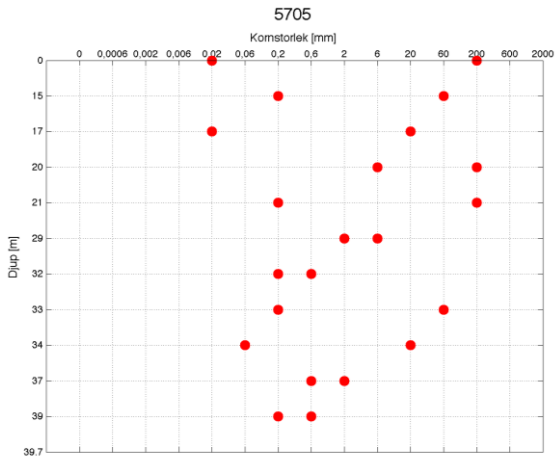
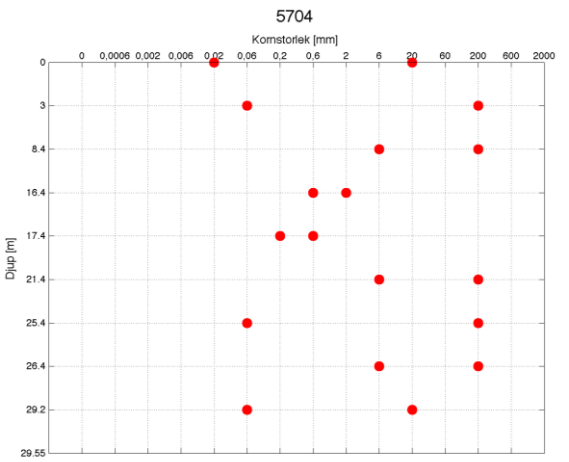
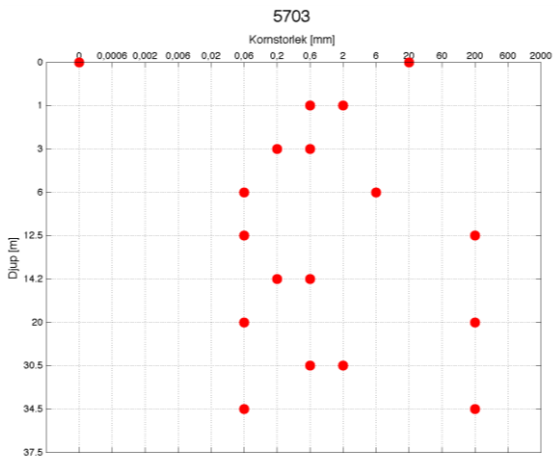
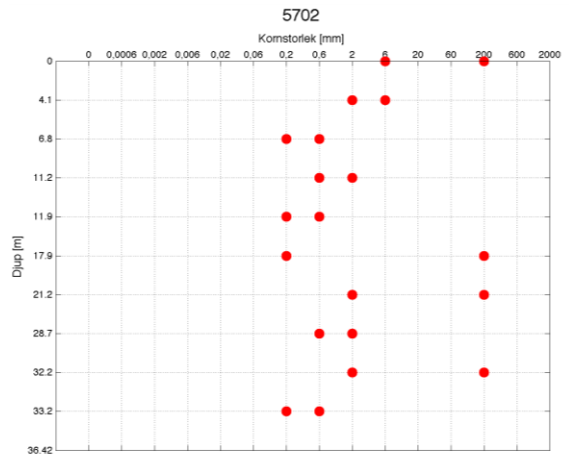
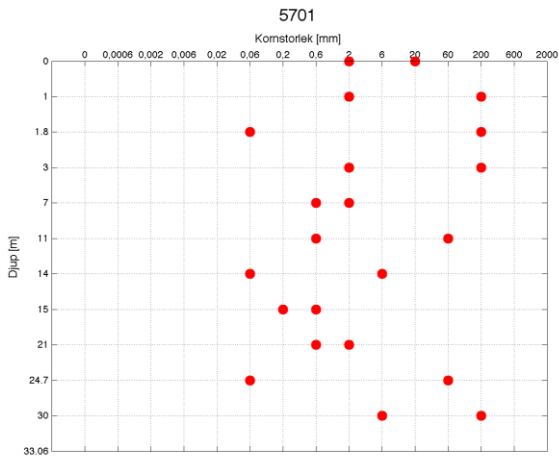




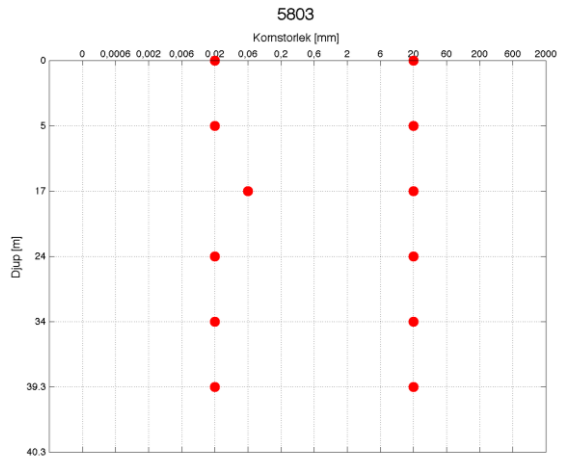
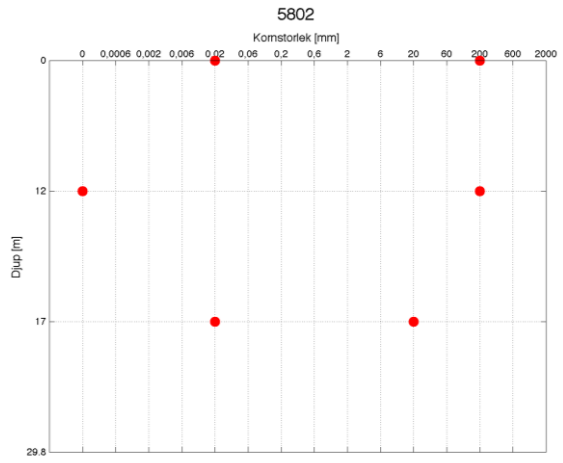
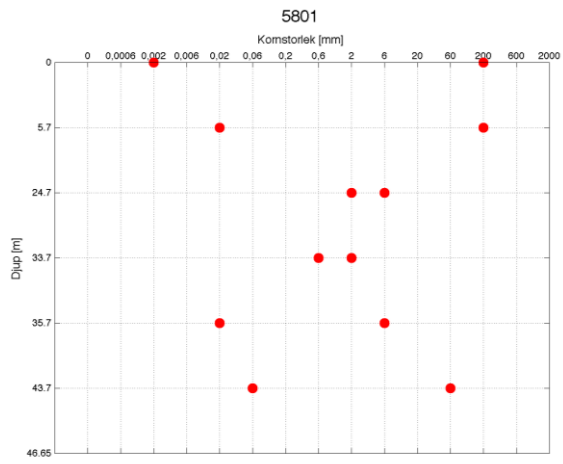
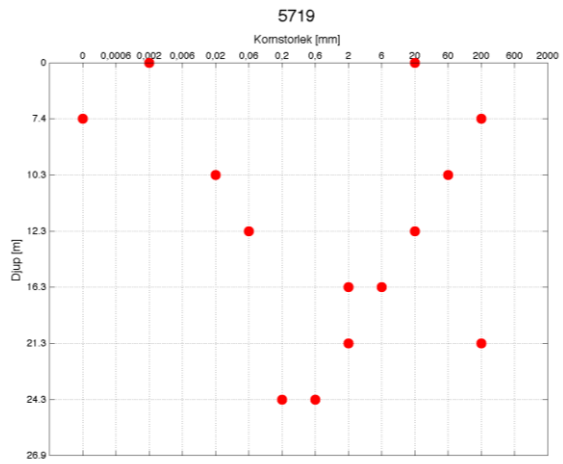
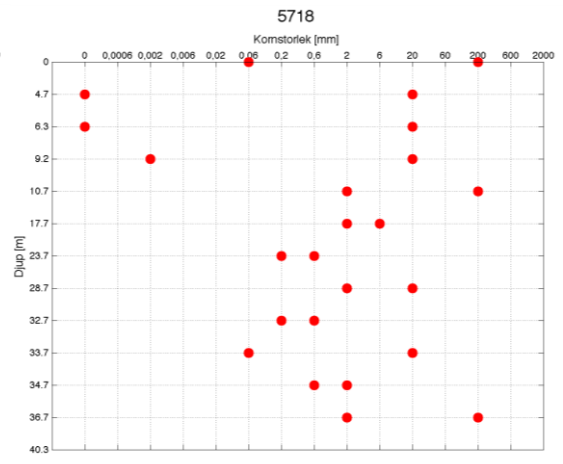
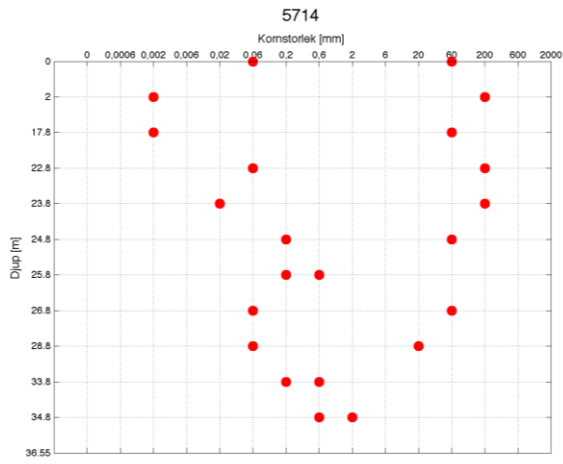


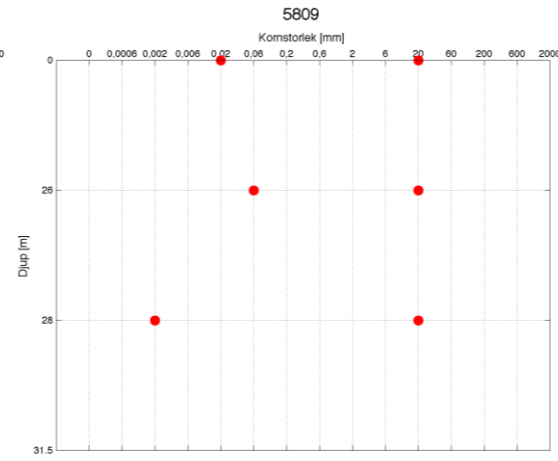
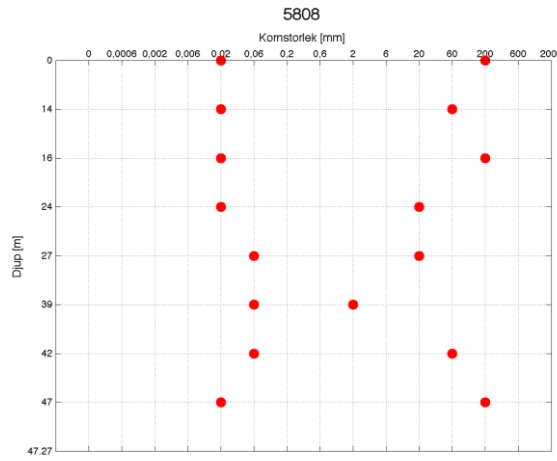
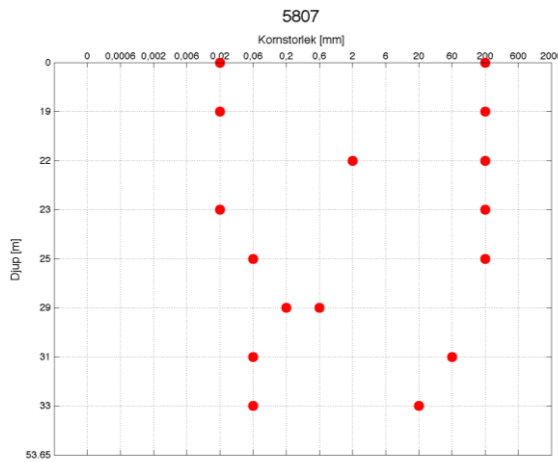
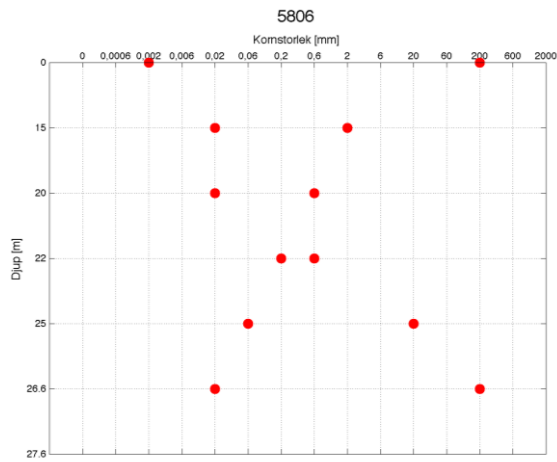
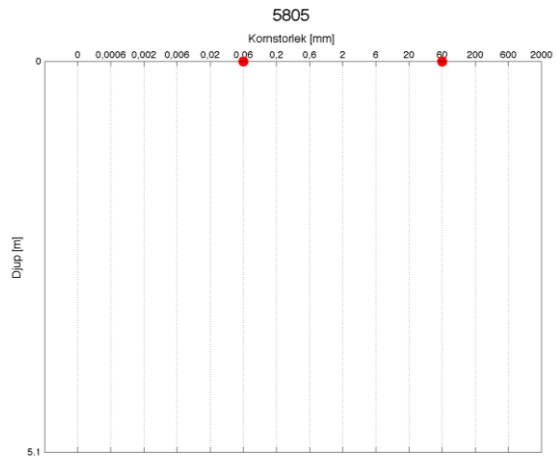
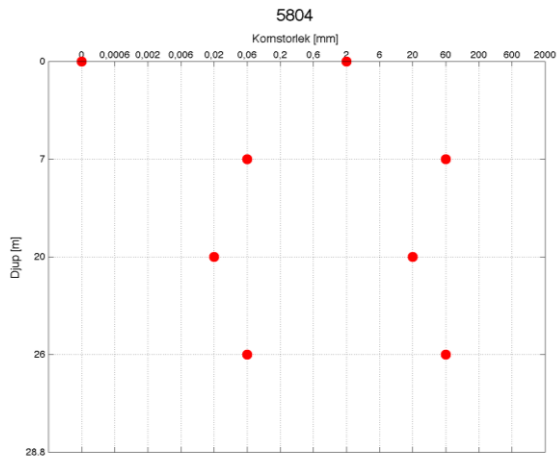
# TUNÅSEN

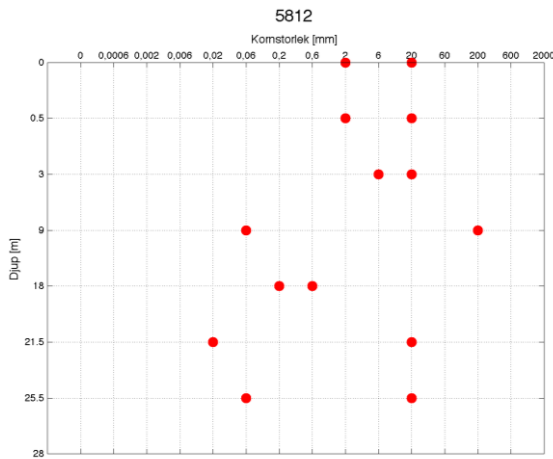
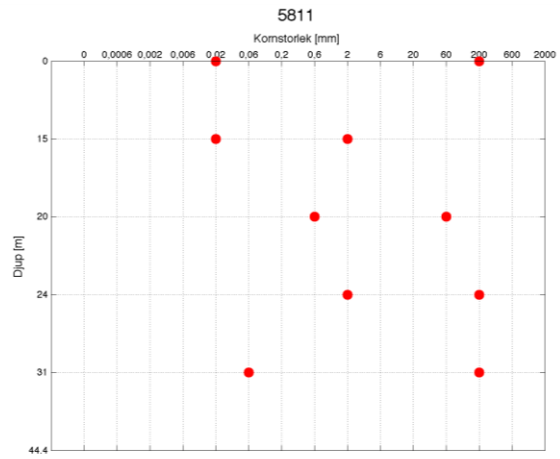
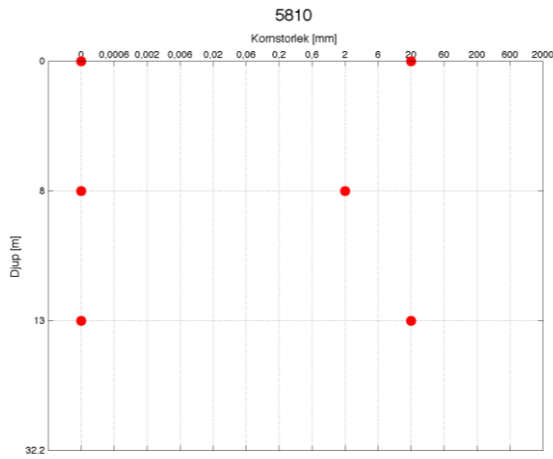




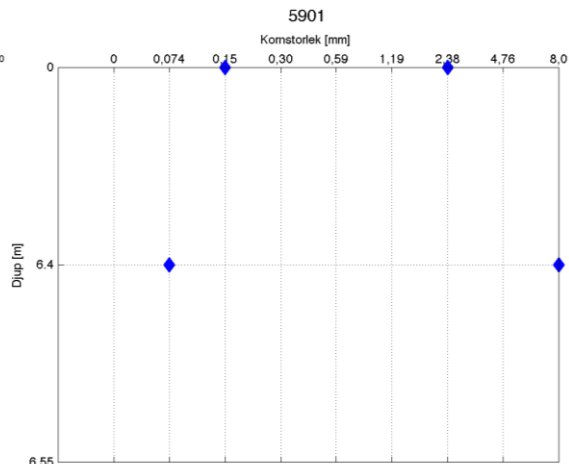
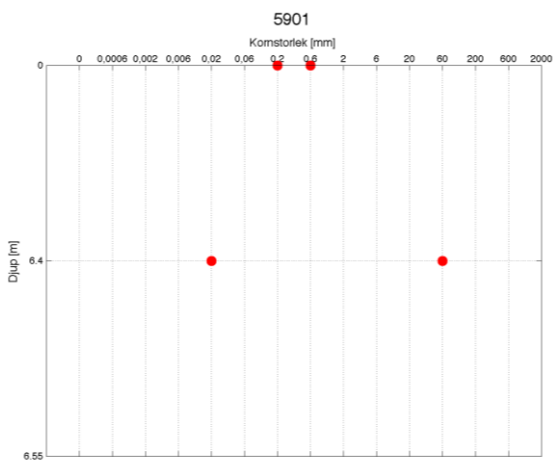




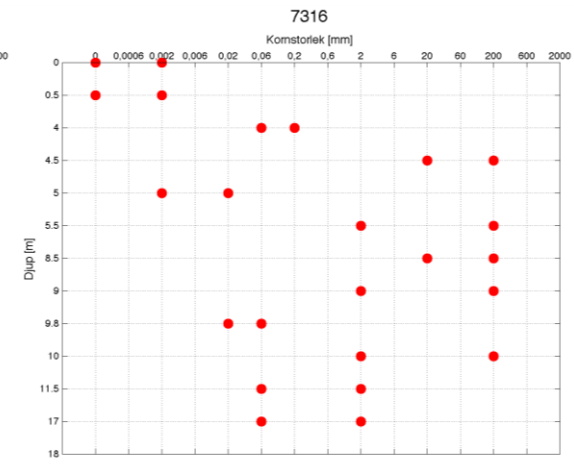
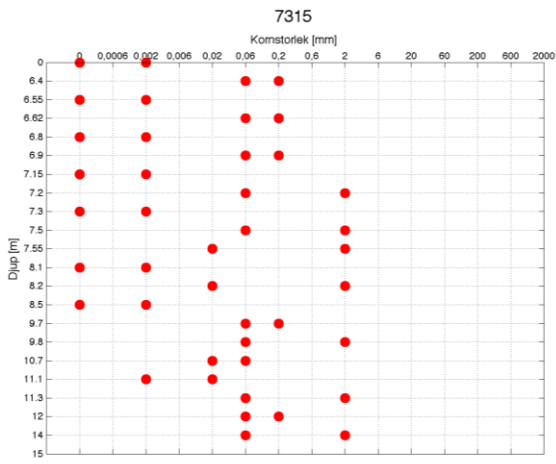
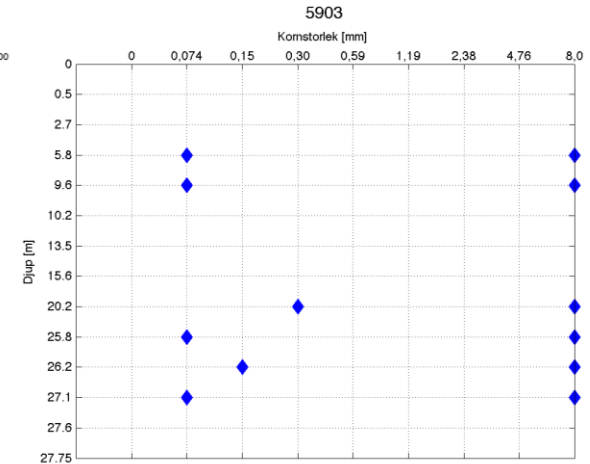
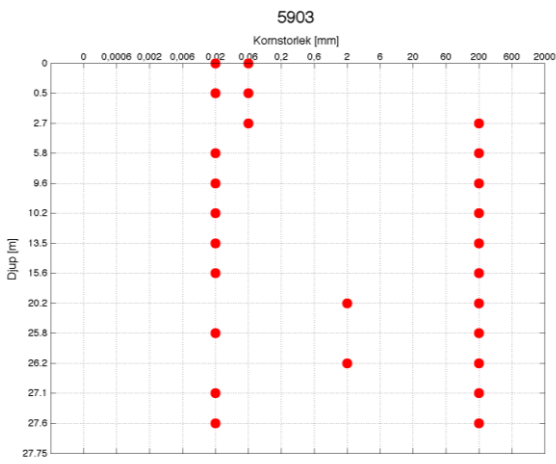
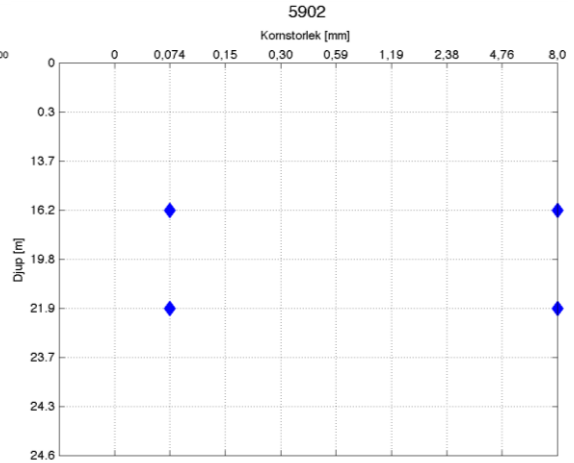
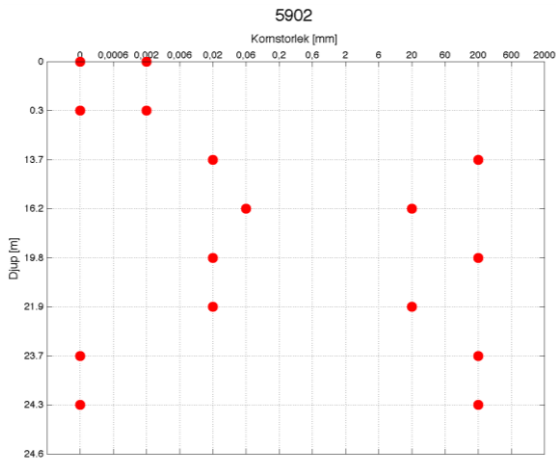


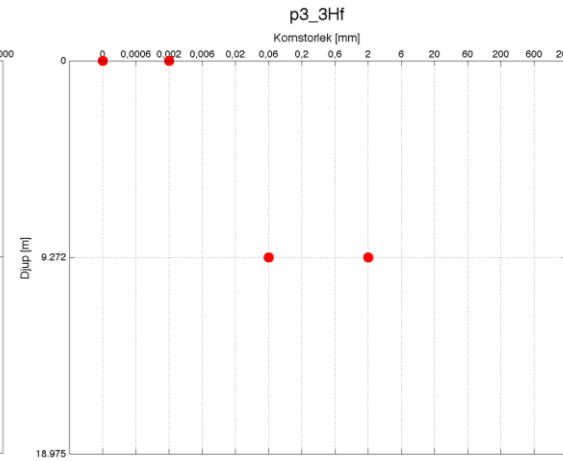
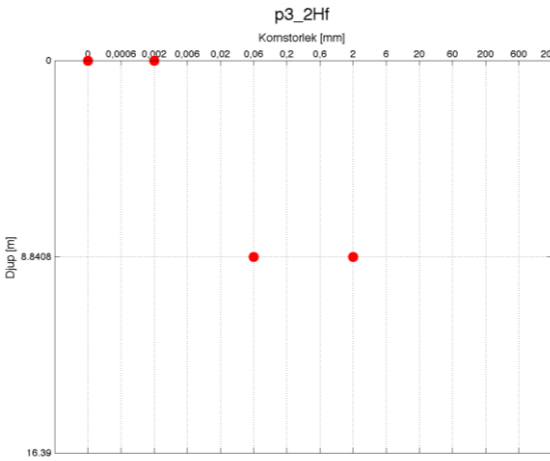
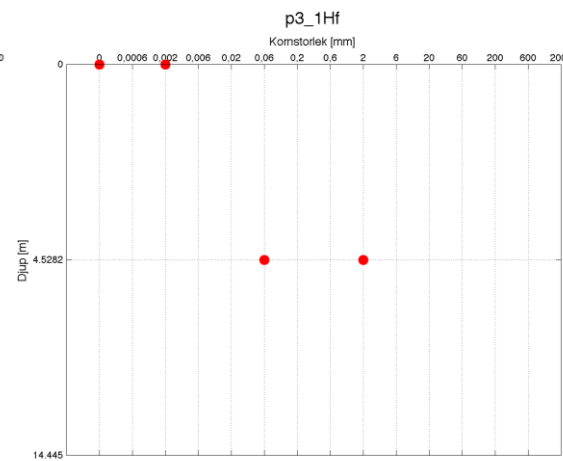
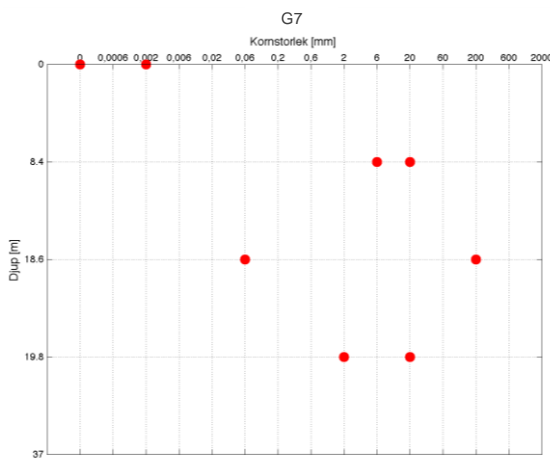
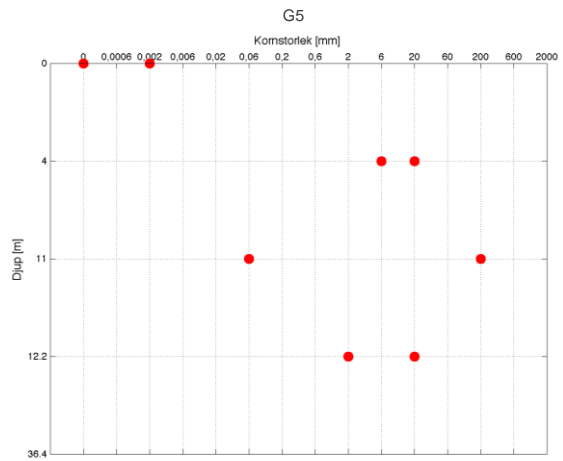
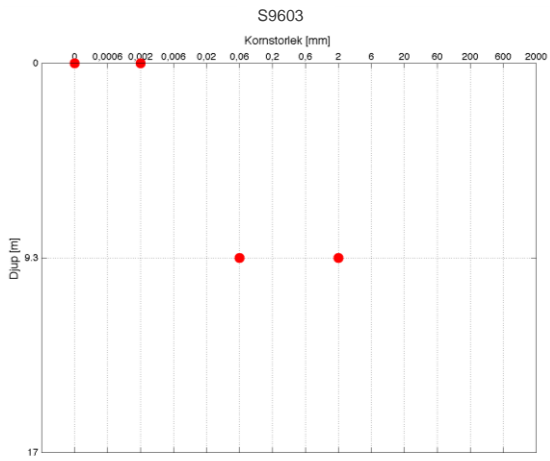


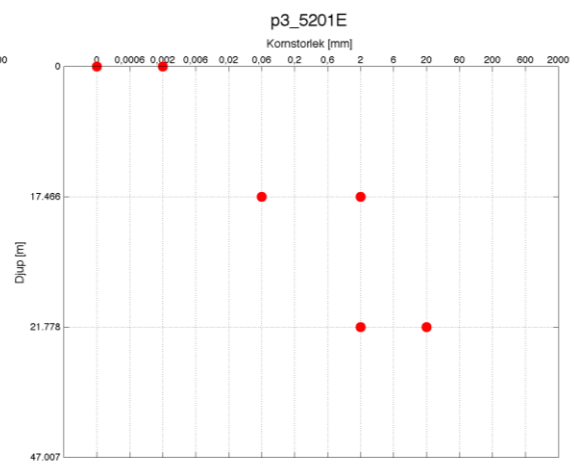
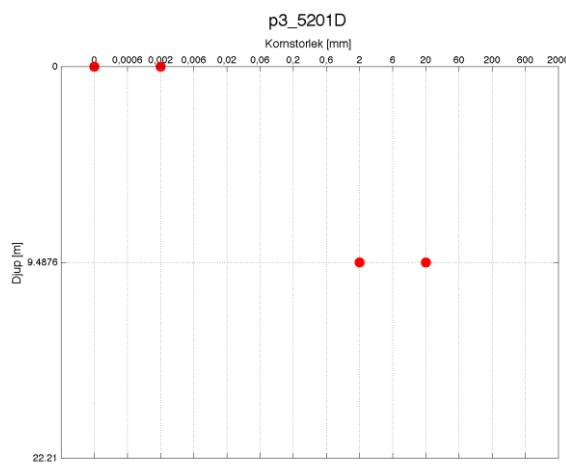
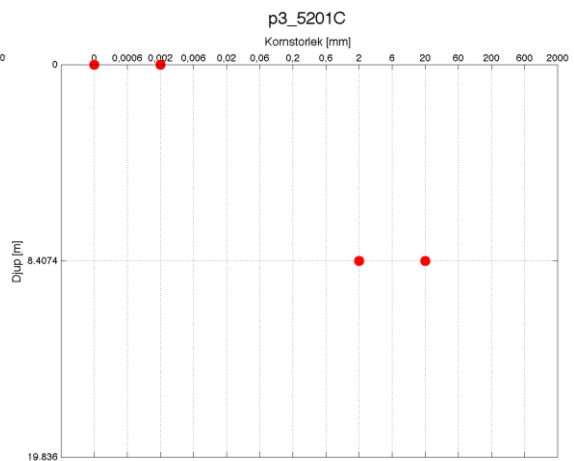
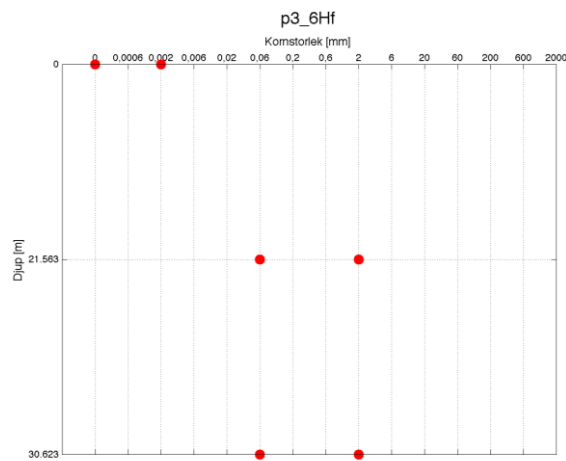
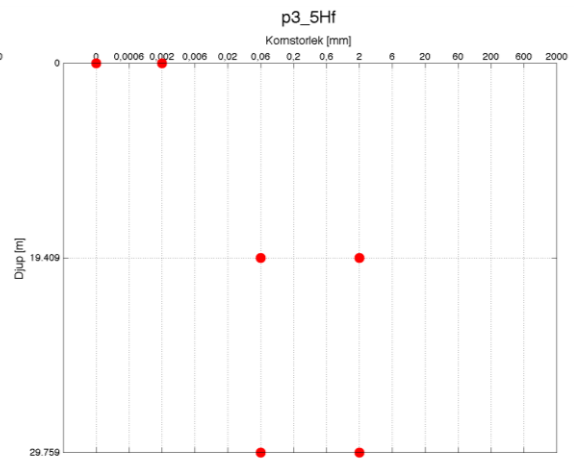
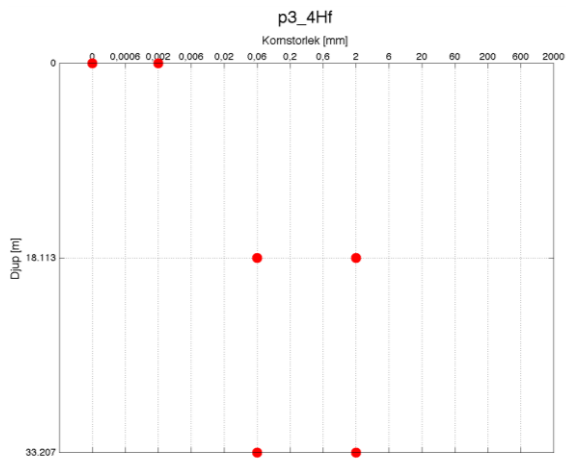
## ÖVRIGA RÖR INOM FOKUSOMRÅDET

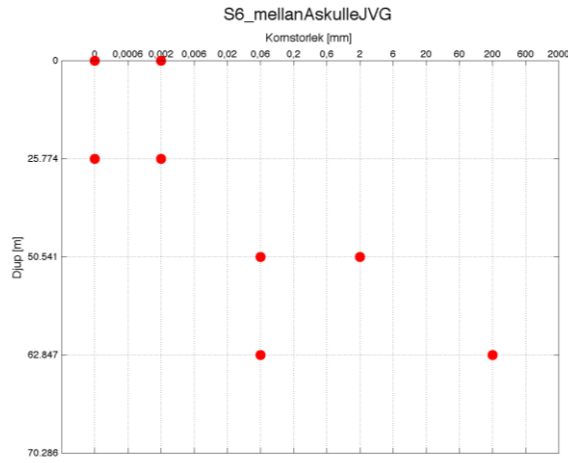
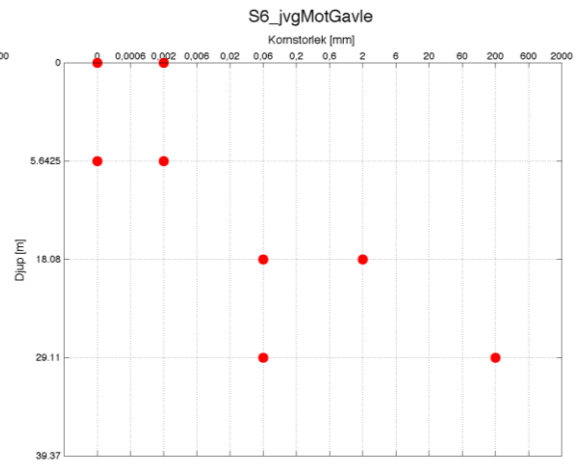
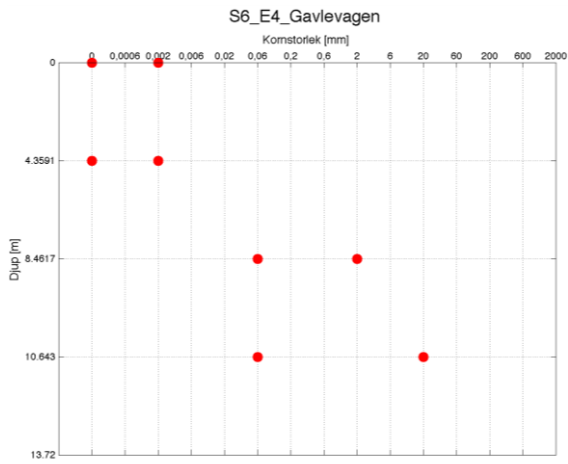
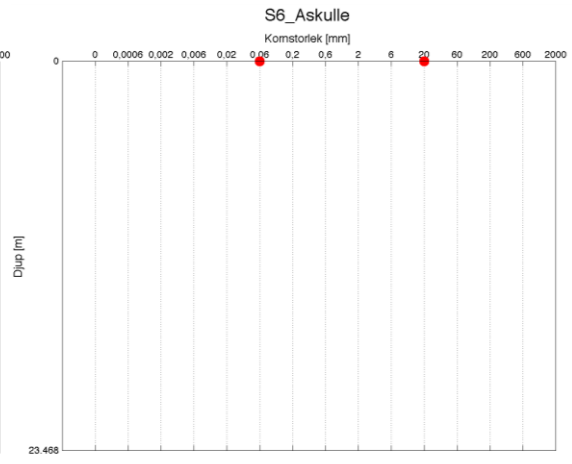
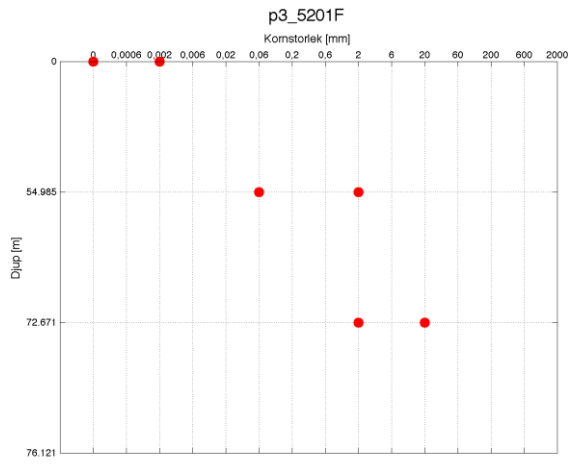












## BILAGA E – INTEGRERAD HORISONTELL HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Skattade värden på integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet inom fokusområdet, baserat på lagerföljder.

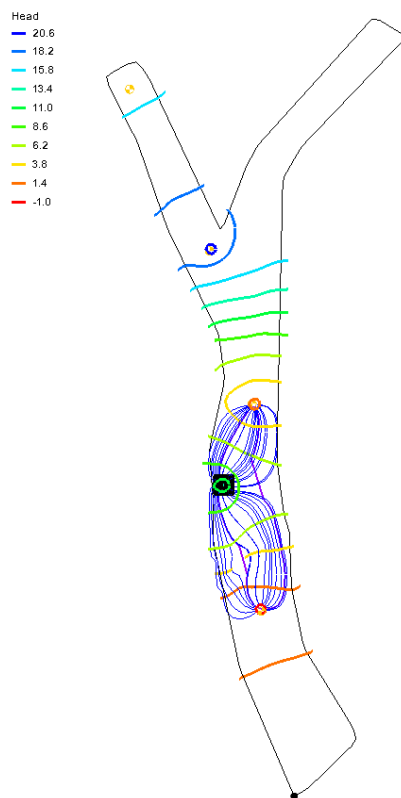
Borrhål	Beräknad hydraulisk konduktivitet (m/s)							
	Alla kornfraktioner		% störst kornfraktion		Finast kornfraktion		Grövst kornfraktion	
	min	max	min	max	min	max	min	max
5201	0,0038366	0,94118	0,049588	0,94118	0,0038366	0,89588	0,049588	0,94118
5202	0,0059369	0,5949	0,0059701	0,63004	0,005935	0,59521	0,59301	0,63004
5203	0,00063773	0,92664	0,11154	0,92664	0,00062197	0,6245	0,90314	0,92664
5204	0,00034793	0,63644	0,038375	0,76431	0,00034077	0,34428	0,57699	0,76431
5701	0,0011442	0,30712	0,0012019	0,31234	0,0011354	0,16479	0,27438	0,56089
5702	0,0014495	0,44551	0,0014495	0,44551	0,0014495	0,16966	0,43666	0,44551
5703	0,000051331	0,43403	0,00034396	0,45117	0,000018925	0,0076213	0,40555	0,45117
5704	0,0050262	0,71803	0,0057543	0,83127	0,0050134	0,50361	0,71765	0,83127
5705	0,00035307	0,61289	0,00086466	0,76385	0,00033581	0,034329	0,60484	0,83934
5706	0,000049808	0,78997	0,00079231	0,88454	0,000028933	0,0077554	0,78711	0,88454
5707	0,0047798	0,86412	0,0049321	0,86412	0,0047688	0,67	0,65055	0,86412
5708	0,000024686	0,03193	0,001	1	4,8889E-07	0,0043267	0,031833	1
5709	0,00063108	0,55243	0,0007946	0,61981	0,00062627	0,26535	0,51264	0,63832
5710	0,00005683	0,96907	0,00087155	0,96935	0,000036025	0,029572	0,96907	1
5711	0,00041349	0,69518	0,001	0,69518	0,00041349	0,10862	0,66164	0,69518
5713	0,00023115	0,61459	0,0022874	0,73139	0,00022744	0,12274	0,3397	0,73139
5714	0,000022493	0,48799	0,00060233	0,62683	5,8857E-06	0,0032972	0,48742	0,89793
5718	0,00052568	0,56651	0,00061947	0,59618	0,00051776	0,37923	0,38008	0,66814
5719	0,00030685	0,23856	0,00083004	0,66255	0,00029852	0,1317	0,22002	0,73616
5801	0,00020088	0,56641	0,00089824	0,56698	0,00019733	0,020359	0,52991	0,62958
5802	8,3223E-08	0,57094	0,001	1	8,3221E-08	8,3223E-06	0,5709	1
5803	9,9834E-06	0,12503	0,001	1	2,5633E-07	0,0017452	0,001	1
5804	7,5229E-07	0,0075505	0,00027595	0,2753	7,5229E-07	0,000075229	0,001	1
5805	0,000001	0,01	0,000001	0,0001	0,000001	0,0001	0,001	1
5806	4,4208E-06	0,58177	0,00062141	0,63967	1,1745E-06	0,00069136	0,57979	0,63967
5807	0,000047371	0,54104	0,00092585	0,92585	0,000019554	0,023648	0,54096	0,96276
5808	0,00002062	0,53567	0,00078295	0,79056	4,8079E-07	0,0042368	0,47159	0,93717
5809	3,7017E-06	0,0011	0,001	1	1,4614E-07	0,00064319	0,001	1
5810	1E-11	0,84627	0,00084488	0,84627	0	0,000000001	0,00084488	0,84627
5811	0,00018004	0,79852	0,00080642	0,79932	0,00016701	0,16158	0,79739	0,88851
5812	0,0022567	0,64324	0,0056977	0,87512	0,0022517	0,32248	0,32391	0,87512
5816	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01	1
5901	9,7733E-06	0,0010023	9,7939E-06	0,0012061	9,7733E-06	0,00097733	0,000032672	0,023878
5902	0,000018884	0,50513	0,0009725	1	3,8899E-07	0,0033086	0,50508	1
5903	0,00024067	0,9027	0,00089731	0,9027	0,00023441	0,23536	0,9027	0,9027
5904	0,00056071	0,18728	0,0019821	0,4659	0,00054249	0,11169	0,049898	0,66867
5905	0,000031366	0,27337	0,0040277	0,48003	0,000019779	0,024985	0,0040277	0,48003
5907	0,000006542	0,45902	0,00046011	0,45902	0,000006542	0,0048619	0,15028	0,45902

5908	0,000033571	0,26551	0,00026544	0,27206	6,2941E-07	0,0058865	0,26544	1
5909	3,6966E-07	0,003764	0,00062608	0,62898	3,6966E-07	0,0030033	0,00067472	0,67718
5910	0,000013662	0,72801	0,00077014	0,73239	2,8142E-07	0,0023936	0,72571	0,73239
5911	6,667E-08	0,0010381	0,00038714	0,38157	6,6667E-08	0,000006667	0,00038714	0,38157
5912	9,2008E-06	0,0010087	0,00009648	0,088266	0,000004309	0,0012957	0,00009648	0,088266
6310	0,00030838	0,31462	0,00030838	0,31462	0,00030838	0,31462	0,00030838	0,31462
6311	0,00062537	0,62875	0,00062537	0,62875	0,00062537	0,62875	0,00062537	0,62875
6312	0,00052988	0,53412	0,00052988	0,53412	0,00052988	0,53412	0,00052988	0,53412
6313	0,00027659	0,2831	0,00027659	0,2831	0,00027659	0,2831	0,00027659	0,2831
7315	6,4596E-07	0,0042177	7,3491E-07	0,0042177	6,4595E-07	0,0032303	7,3491E-07	0,0042177
7316	0,05585	0,35361	0,10025	0,35361	0,05585	0,35361	0,35	0,35361
G5	0,0029074	1	0,039944	1	0,0029074	0,96333	0,039944	1
G7	0,0041679	1	0,046126	1	0,0041679	0,95846	0,046126	1
Huv 1	0,00035779	0,36357	0,00035779	0,36357	0,00035779	0,36357	0,00035779	0,36357
Huv 10	0,00054213	0,54625	0,00054213	0,54625	0,00054213	0,54625	0,00054213	0,54625
Huv 11	0,00068781	0,69063	0,00068781	0,69063	0,00068781	0,69063	0,00068781	0,69063
Huv 12	0,00063451	0,6378	0,00063451	0,6378	0,00063451	0,6378	0,00063451	0,6378
Huv 2	0,00041994	0,42516	0,00041994	0,42516	0,00041994	0,42516	0,00041994	0,42516
Huv 3	0,00046928	0,47406	0,00046928	0,47406	0,00046928	0,47406	0,00046928	0,47406
Huv 4	0,000334	0,34	0,000334	0,34	0,000334	0,34	0,000334	0,34
Huv 5	0,00053172	0,53594	0,00053172	0,53594	0,00053172	0,53594	0,00053172	0,53594
Huv 6	0,00055926	0,56324	0,00055926	0,56324	0,00055926	0,56324	0,00055926	0,56324
Huv 7	0,00049142	0,496	0,00049142	0,496	0,00049142	0,496	0,00049142	0,496
Huv 8	0,00057618	0,58	0,00057618	0,58	0,00057618	0,58	0,00057618	0,58
Huv 9	0,000482	0,48667	0,000482	0,48667	0,000482	0,48667	0,000482	0,48667
S9603	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_6Hf	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_5Hf	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_5201D	0,001	1	0,001	1	0,001	1	0,001	1
p3_2Hf	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_1Hf	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_5201C	0,001	1	0,001	1	0,001	1	0,001	1
p3_3Hf	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_5201F	0,000164	0,1716	0,000164	0,1716	0,000164	0,1716	0,000164	0,1716
p3_4Hf	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01	0,000001	0,01
p3_5201E	0,000854	0,85549	0,000854	0,85549	0,000854	0,85549	0,000854	0,85549
S6_Askulle	0,000057	0,0011	0,000057	0,0011	0,000057	0,0011	0,000057	0,0011
S6_E4_Gavlevagen	0,0000338	0,004792	0,0000338	0,004792	0,0000338	0,004792	0,0000338	0,004792
S6_JvgMotGavle	0,000028	0,4871	0,000028	0,4871	0,000028	0,4871	0,000028	0,4871
S6_MellanAskulleJVG	0,0000221	0,38299	0,0000221	0,38299	0,0000221	0,38299	0,0000221	0,38299

## BILAGA F – SIMULERINGSRESULTAT

### Scenario A

Hydraulisk konduktivitet i genomsläppligt lager: 3,06 m/h (rimligt minimum)



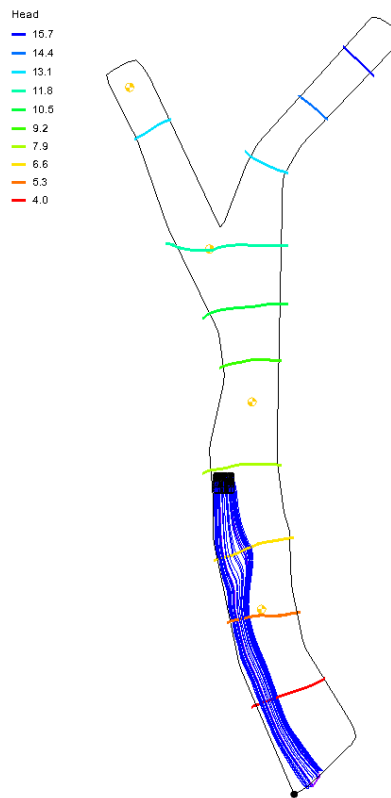
Totalt antal partiklar	72
Fångade partiklar	72

<b>Galgbacken</b>	<b>(102,28)</b>
captured particles	32
min time	53.53333 days
max time	117.9102 days
avg time	72.17264 days

<b>Storvad</b>	<b>(69,27)</b>
captured particles	40
min time	23.54217 days
max time	74.59464 days
avg time	34.73744 days

### Scenario B

Hydraulisk konduktivitet i genomsläppligt lager: 165 m/h (rimligt maximum)



Totalt antal partiklar	72
Fångade partiklar	0

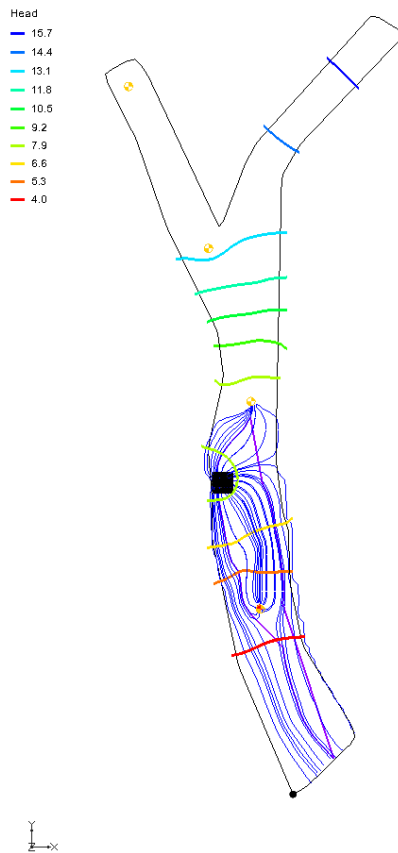
<b>Galgbacken</b>	<b>(102,28)</b>
captured particles	0
traveled past	72
min time*	21.58987 days
max time*	29.81412 days
avg time*	25.3693 days

\* time to row 102

<b>Storvad</b>	<b>(69,27)</b>
captured particles	-
min time	-
max time	-
avg time	-

### Scenario C

Hydraulisk konduktivitet i genomsläppligt lager: 14 m/h (beräknat absolut minimum)



Totalt antal partiklar 72  
Fångade partiklar 52

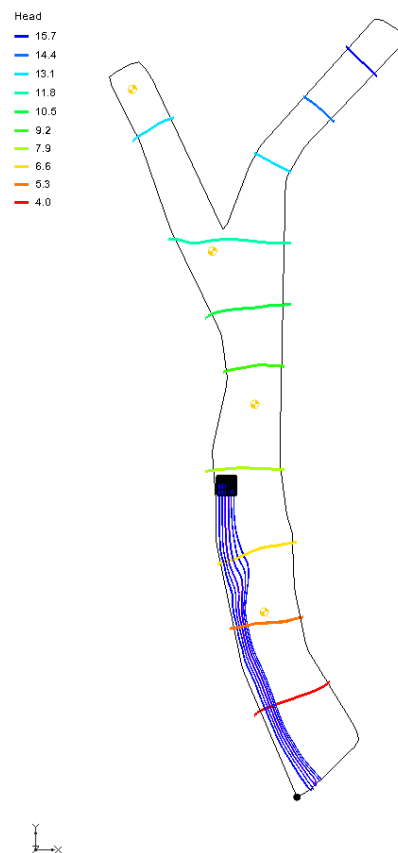
<b>Galgbacken</b>	<b>(102,28)</b>	
captured particles	30	
traveled past	20	
min time*	154.8814	days
max time*	711.9011	days
avg time*	232.7853	days

\* includes particle that traveled past

<b>Storvad</b>	<b>(69,27)</b>	
captured particles	22	
min time	213.2018	days
max time	759.0709	days
avg time	310.5777	days

### Scenario D

Hydraulisk konduktivitet i genomsläppligt lager: 1800 m/h (beräknat absolut maximum)



Totalt antal partiklar 72  
Fångade partiklar 0

<b>Galgbacken</b>	<b>(102,28)</b>	
captured particles	0	
traveled past	72	
min time*	2.101858	days
max time*	2.750614	days
avg time*	2.398893	days

<b>Storvad</b>	<b>(69,27)</b>	
captured particles	0	
min time	-	
max time	-	
avg time	-	



## BILAGA G – MATLABPROGRAM FÖR BERÄKNING AV HYDRAULISK KONDUKTIVITET

### Kornstorleksfördelning och koppling till K-värden

```
%1) Fördelningar av olika jordfraktioner i ett jordlager beräknas
%2) K beräknas för fyra scenarion: huvudfraktionen bestämmer, alla
%fraktioner räknas in, finaste fraktionen bestämmer och grövsta funktionen
%bestämmer

%-----Inför första loopen-----
%Rensa alla tidigare parametrar
clear all

%Läs in fil med borrhålsdata
A=load('indataMatlab.txt');

%Välj vilken del av den importerade borrhålsdatan som ska behandlas
B=A(:,2:6);

%Specificera itereringslängd för huvudloopen
N=size(A,1);

%-----Information från BoreholeDataMaster bearbetas-----
%1)Nödvändiga filer inför skapande av diagram skrivs
%2)Beräknade min- och maxK baserat på alla ingående fraktioner, den
%procentuellt största fraktionen, den finaste fraktionen samt den grövsta
%fraktionen beräknas för varje lager

for k=1:N
%Matriser och vektorer skapas inuti loopen för att kunna rensas efter varje
%iteration:

%Matris med övre och undre gräns (placering) för varje jordart
matris=zeros(1,15);

%Vektor för K
kond=[];

%Vektor med huvudfraktionens K
kondStorst=[];

%Tom vektor för sparande av fraktionsindex
fraktion=[];

%Tomma vektorer för sparande av K-värden baserat på finaste och grövsta
%fraktionen
Kfin_min=[];
Kfin_max=[];
Kgrov_min=[];
Kgrov_max=[];
```

```

%Borrhålets id specificeras
id=(A(k,1));

%Specificera den del av varje rad som ska behandlas
rad=B(k,2:end);

%Letar efter grus som huvudfraktion
if ismember(rad(1),1) && ismember(rad(2),12)    %Sandigt grus
    matris(1,9)=1;
    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=5.7e-5;                          %K(sand&grus)
    kond(end+1)=1.1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-3;                       %K(grus)
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=10;                           %Fraktionsindex: grus
    fraktion(end+1)=7;                            %Fraktionsindex: sand
    matris(1,6)=1;
    matris(1,9)=1;
elseif ismember(rad(1),1) && ~ismember(rad(2),12)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1e-3;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=10;
elseif ismember(rad(2),1)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=10;
elseif ismember(rad(3),1)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1;
    P(end+1)=40;
    P(end+1)=100;
    jord(end+1)=1;
    jord(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=10;
    F(end+1)=0;
    F(end+1)=0;
    Fjord(end+1)=0;
    Fjord(end+1)=0;
elseif ismember(rad(4),1)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=10;
end

```

```

%Letar efter fingrus som huvudfraktion
if ismember(rad(1),2) && ismember(rad(2),12) %Sandigt fingrus
    matris(1,9)=1;
    matris(1,10)=1;
    kond(end+1)=5.7e-5; %K(sand&grus)
    kond(end+1)=1.1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-3; %K(fingrus)
    kondStorst(end+1)=1e-1;
    fraktion(end+1)=8; %Fraktionsindex: fingrus
    fraktion(end+1)=7;
    matris(1,6)=1;
    matris(1,9)=1;
elseif ismember(rad(1),2) && ~ismember(rad(2),12)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,10)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1e-1;
    kondStorst(end+1)=1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-1;
    fraktion(end+1)=8;
elseif ismember(rad(2),2)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,10)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1e-1;
    fraktion(end+1)=8;
elseif ismember(rad(3),2)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,10)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1e-1;
    fraktion(end+1)=8;
elseif ismember(rad(4),2)
    matris(1,9)=1;
    matris(1,10)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1e-1;
    fraktion(end+1)=8;
end

%Letar efter grovgrus som huvudfraktion. OBS! 50-talsbenämning.
%Idag=mellangrus
if ismember(rad(1),3) && ismember(rad(2),12) %Sandigt grovgrus
    matris(1,10)=1;
    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=5.7e-5; %K(sand&grus)
    kond(end+1)=1.1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-2; %K(grovgrus)
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=9; %Fraktionsindex: grovgrus
    fraktion(end+1)=7;
    matris(1,6)=1;
    matris(1,9)=1;
elseif ismember(rad(1),3) && ~ismember(rad(2),12)

```

```

        matris(1,10)=1;
        matris(1,11)=1;
        kond(end+1)=1e-2;
        kond(end+1)=1;
        kondStorst(end+1)=1e-2;
        kondStorst(end+1)=1;
        fraktion(end+1)=9;
elseif ismember(rad(2),3)
        matris(1,10)=1;
        matris(1,11)=1;
        kond(end+1)=1e-2;
        kond(end+1)=1;
        fraktion(end+1)=9;
elseif ismember(rad(3),3)
        matris(1,10)=1;
        matris(1,11)=1;
        kond(end+1)=1e-2;
        kond(end+1)=1;
        fraktion(end+1)=9;
elseif ismember(rad(4),3)
        matris(1,10)=1;
        matris(1,11)=1;
        kond(end+1)=1e-2;
        kond(end+1)=1;
        fraktion(end+1)=9;
end

%Letar efter sand som huvudfraktion
if ismember(rad(1),4) && ismember(rad(2),13)      %Grusig sand
        matris(1,6)=1;
        matris(1,9)=1;
        kond(end+1)=5.7e-5;                        %K(sand&grus)
        kond(end+1)=1.1e-3;
        kondStorst(end+1)=1e-6;                    %K(sand)
        kondStorst(end+1)=1e-2;
        fraktion(end+1)=7;
        fraktion(end+1)=10;
        matris(1,9)=1;
        matris(1,12)=1;
elseif ismember(rad(1),4) && ~ismember(rad(2),13)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,9)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-2;
        kondStorst(end+1)=1e-6;
        kondStorst(end+1)=1e-2;
        fraktion(end+1)=7;
elseif ismember(rad(2),4)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,9)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-2;
        fraktion(end+1)=7;
elseif ismember(rad(3),4)

```

```

        matris(1,6)=1;
        matris(1,9)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-2;
        fraktion(end+1)=7;
elseif ismember(rad(4),4)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,9)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-2;
        fraktion(end+1)=7;
end

%Letar efter finsand som huvudfraktion
if ismember(rad(1),5) && ismember(rad(2),13) %Grusig finsand
        matris(1,6)=1;
        matris(1,7)=1;
        kond(end+1)=5.7e-5; %K(sand&grus)
        kond(end+1)=1.1e-3;
        kondStorst(end+1)=1e-6; %K(finsand)
        kondStorst(end+1)=1e-4;
        fraktion(end+1)=4; %Fraktionsindex: finsand
        fraktion(end+1)=10;
        matris(1,9)=1;
        matris(1,12)=1;
elseif ismember(rad(1),5) && ~ismember(rad(2),13)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,7)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-4;
        kondStorst(end+1)=1e-6;
        kondStorst(end+1)=1e-4;
        fraktion(end+1)=4;
elseif ismember(rad(2),5)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,7)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-4;
        fraktion(end+1)=4;
elseif ismember(rad(3),5)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,7)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-4;
        fraktion(end+1)=4;
elseif ismember(rad(4),5)
        matris(1,6)=1;
        matris(1,7)=1;
        kond(end+1)=1e-6;
        kond(end+1)=1e-4;
        fraktion(end+1)=4;
end

%Letar efter mellansand som huvudfraktion

```

```

if ismember(rad(1),6) && ismember(rad(2),13) %Grusig mellansand
    matris(1,7)=1;
    matris(1,8)=1;
    kond(end+1)=5.7e-5; %K(sand&grus)
    kond(end+1)=1.1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-5; %K(mellansand)
    kondStorst(end+1)=1e-3;
    fraktion(end+1)=5; %Fraktionsindex: mellansand
    fraktion(end+1)=10;
    matris(1,9)=1;
    matris(1,12)=1;
elseif ismember(rad(1),6) && ~ismember(rad(2),13)
    matris(1,7)=1;
    matris(1,8)=1;
    kond(end+1)=1e-5;
    kond(end+1)=1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-5;
    kondStorst(end+1)=1e-3;
    fraktion(end+1)=5;
elseif ismember(rad(2),6)
    matris(1,7)=1;
    matris(1,8)=1;
    kond(end+1)=1e-5;
    kond(end+1)=1e-3;
    fraktion(end+1)=5;
elseif ismember(rad(3),6)
    matris(1,7)=1;
    matris(1,8)=1;
    kond(end+1)=1e-5;
    kond(end+1)=1e-3;
    fraktion(end+1)=5;
elseif ismember(rad(4),6)
    matris(1,7)=1;
    matris(1,8)=1;
    kond(end+1)=1e-5;
    kond(end+1)=1e-3;
    fraktion(end+1)=5;
end

%Letar efter grovsand som huvudfraktion
if ismember(rad(1),7) && ismember(rad(2),13) %Grusig grovsand
    matris(1,8)=1;
    matris(1,9)=1;
    kond(end+1)=5.7e-5; %K(sand&grus)
    kond(end+1)=1.1e-3;
    kondStorst(end+1)=1e-4; %K(grovsand)
    kondStorst(end+1)=1e-2;
    fraktion(end+1)=6; %Fraktionsindex: grovsand
    fraktion(end+1)=10;
    matris(1,9)=1;
    matris(1,12)=1;
elseif ismember(rad(1),7) && ~ismember(rad(2),13)
    matris(1,8)=1;
    matris(1,9)=1;

```

```

        kond(end+1)=1e-4;
        kond(end+1)=1e-2;
        kondStorst(end+1)=1e-4;
        kondStorst(end+1)=1e-2;
        fraktion(end+1)=6;
elseif ismember(rad(2),7)
    matris(1,8)=1;
    matris(1,9)=1;
    kond(end+1)=1e-4;
    kond(end+1)=1e-2;
    fraktion(end+1)=6;
elseif ismember(rad(3),7)
    matris(1,8)=1;
    matris(1,9)=1;
    kond(end+1)=1e-4;
    kond(end+1)=1e-2;
    fraktion(end+1)=6;
elseif ismember(rad(4),7)
    matris(1,8)=1;
    matris(1,9)=1;
    kond(end+1)=1e-4;
    kond(end+1)=1e-2;
    fraktion(end+1)=6;
end

%Letar efter "lera"
if ismember(rad(1),8)
    matris(1,1)=1;
    matris(1,3)=1;
    kond(end+1)=1e-11;
    kond(end+1)=1e-9;
    kondStorst(end+1)=1e-11;
    kondStorst(end+1)=1e-9;
    fraktion(end+1)=1;
elseif ismember(rad(2),8)
    matris(1,1)=1;
    matris(1,3)=1;
    kond(end+1)=1e-11;
    kond(end+1)=1e-9;
    fraktion(end+1)=1;
elseif ismember(rad(3),8)
    matris(1,1)=1;
    matris(1,3)=1;
    kond(end+1)=1e-11;
    kond(end+1)=1e-9;
    fraktion(end+1)=1;
elseif ismember(rad(4),8)
    matris(1,1)=1;
    matris(1,3)=1;
    kond(end+1)=1e-11;
    kond(end+1)=1e-9;
    fraktion(end+1)=1;
end

%K(lera)
%Fraktionsindex: lera

```

```

%Letar efter "stenmaterial"
if ismember(10,rad)
    matris(1,11)=1;
    matris(1,13)=1;
    kond(end+1)=1; %K(stenmaterial)
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=11; %Fraktionsindex: stenmaterial
end

%Letar efter "mjäla"
if ismember(rad(1),11)
    matris(1,3)=1;
    matris(1,5)=1;
    kond(end+1)=1e-9; %K(mjäla)
    kond(end+1)=1e-7;
    kondStorst(end+1)=1e-9;
    kondStorst(end+1)=1e-7;
    fraktion(end+1)=2; %Fraktionsindex: mjäla
elseif ismember(rad(2),11)
    matris(1,3)=1;
    matris(1,5)=1;
    kond(end+1)=1e-9;
    kond(end+1)=1e-7;
    fraktion(end+1)=2;
elseif ismember(rad(3),11)
    matris(1,3)=1;
    matris(1,5)=1;
    kond(end+1)=1e-9;
    kond(end+1)=1e-7;
    fraktion(end+1)=2;
elseif ismember(rad(4),11)
    matris(1,3)=1;
    matris(1,5)=1;
    kond(end+1)=1e-9;
    kond(end+1)=1e-7;
    fraktion(end+1)=2;
end

%Letar efter sandig(t)
if ismember(12,rad) && ~ismember(1,rad) && ~ismember(2,rad)...
    && ~ismember(3,rad)
    matris(1,6)=1;
    matris(1,9)=1;
    kond(end+1)=1e-6; %K(sand)
    kond(end+1)=1e-2;
    fraktion(end+1)=7;
end

%Letar efter grusig(t)
if ismember(13,rad) && ~ismember(4,rad) && ~ismember(5,rad)...
    && ~ismember(6,rad) && ~ismember(7,rad)
    matris(1,9)=1;

```



```

    matris(1,11)=1;
    kond(end+1)=1e-3;
    kond(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=10;
end

%Letar efter olika former av sten
if ismember(15,rad)
    matris(1,11)=1;
    matris(1,13)=1;
    kond(end+1)=1;
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=11;
elseif ismember(14,rad)
    matris(1,12)=1;
    matris(1,13)=1;
    kond(end+1)=1;
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=11;
end

%Letar efter "lerig(t)"
if ismember(16,rad)
    matris(1,1)=1;
    matris(1,3)=1;
    kond(end+1)=1e-11;
    kond(end+1)=1e-9;
    fraktion(end+1)=1;
end

%Letar efter "mjällig(t)"
if ismember(18,rad)
    matris(1,3)=1;
    matris(1,5)=1;
    kond(end+1)=1e-9;
    kond(end+1)=1e-7;
    fraktion(end+1)=2;
end

%Letar efter "moig(t)"
if ismember(19,rad)
    matris(1,5)=1;
    matris(1,7)=1;
    kond(end+1)=1e-7;
    kond(end+1)=1e-5;
    fraktion(end+1)=3;
end

%Letar efter "stenjord"
if ismember(20,rad)

```

%K(grus)

%Letar efter "stenigt/stenblandat"

%Fraktionsindex: sten

%Letar efter "med sten"

%K(lera)

%K(mjåla)

%K(finmo)

%Fraktionsindex: finmo

```

    matris(1,11)=1;
    matris(1,13)=1;
    kond(end+1)=1;           %K(sten)
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=11;
end

%Letar efter "blockjord"
if ismember(24,rad)
    matris(1,13)=1;
    matris(1,15)=1;
    kond(end+1)=1;           %K(block)
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=11;
end

%Letar efter "finmo"
if ismember(25,rad)
    matris(1,5)=1;
    matris(1,6)=1;
    kond(end+1)=1e-7;        %K(finmo)
    kond(end+1)=1e-5;
    kondStorst(end+1)=1e-7;
    kondStorst(end+1)=1e-5;
    fraktion(end+1)=3;
end

%Letar efter "sten eller block"
if ismember(28,rad)
    matris(1,11)=1;
    matris(1,15)=1;
    kond(end+1)=NaN;
    kond(end+1)=NaN;
    kondStorst(end+1)=NaN;
    kondStorst(end+1)=NaN;
    fraktion(end+1)=11;
end

%Letar efter "rullsten"
if ismember(29,rad)
    matris(1,11)=1;
    matris(1,13)=1;
    kond(end+1)=1;           %K(sten)
    kond(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    kondStorst(end+1)=1;
    fraktion(end+1)=11;
end

%Letar efter "stenig morän". Tilldelas "25" (finmo) eftersom den

```

```

%hydrauliska konduktiviteten är i samma storleksordning.
if ismember(32,rad)
    matris(1,5)=1;
    matris(1,6)=1;
    kond(end+1)=1e-7;           %K(grusig morän)
    kond(end+1)=1e-5;
    kondStorst(end+1)=1e-7;
    kondStorst(end+1)=1e-5;
    fraktion(end+1)=3;
end

%Letar efter "grusig morän". Tilldelas "25" (finmo) eftersom den
%hydrauliska konduktiviteten är i samma storleksordning.
if ismember(31,rad)
    matris(1,5)=1;
    matris(1,6)=1;
    kond(end+1)=1e-7;           %K(stenig morän)
    kond(end+1)=1e-5;
    kondStorst(end+1)=1e-7;
    kondStorst(end+1)=1e-5;
    fraktion(end+1)=3;
end

%Letar efter berggrund
if ismember(9,rad)
    kond(end+1)=NaN;
    kond(end+1)=NaN;
    kondStorst(end+1)=NaN;
    kondStorst(end+1)=NaN;
    fraktion(end+1)=NaN;
end

%Letar efter "ej definierat avslutsmaterial"
if ismember(0,rad)
    kond(end+1)=NaN;
    kond(end+1)=NaN;
    kondStorst(end+1)=NaN;
    kondStorst(end+1)=NaN;
    fraktion(end+1)=NaN;
end

%Hitta och spara endast den undre och övre gränsen för kornstorlek i varje
%lager
tom_matris=zeros(1,15);        %Tom matris skapas
first=find(matris,1);          %Hitta positionen för den första ettan
last=find(matris,1,'last');    %Hitta positionen för den sista ettan
tom_matris(first)=1;          %Placera "1" på motsvarande position i "tom_matris"
tom_matris(last)=1;          %Placera "1" på motsvarande position i "tom_matris"

%Skapa en matris med borrhålsnummer, lagerdjup och vektorn som
%markerar störst och minst kornstorlek.
%Fil skapas med namnet 'borrhålsnummer'.txt
matris_hel=[A(k,1) B(k,1) tom_matris];
filnamn=[num2str(id(1)) '.txt'];

```

```

dlmwrite(filnamn, matris_hel, '-append');

%Hitta och spara största och minsta värdet på hydraulisk konduktivitet för varje
%lager om alla ingående fraktioner tas i beaktning
minkond=min(kond);
maxkond=max(kond);
kondlimits=[B(k,1) minkond maxkond];
kondlimitsfilnamn=['kondlimits' num2str(id(1)) '.txt'];
dlmwrite(kondlimitsfilnamn, kondlimits, '-append');

%Hitta och spara största och minsta värdet på hydraulisk konduktivitet om
%endast den procentuellt största fraktionen tas i beaktning
minkondStorst=min(kondStorst);
maxkondStorst=max(kondStorst);
kondStorstlimits=[B(k,1) minkondStorst maxkondStorst];
kondStorstlimitsfilnamn=['kondStorstlimits' num2str(id(1)) '.txt'];
dlmwrite(kondStorstlimitsfilnamn, kondStorstlimits, '-append');

%Hitta och spara största och minsta kornstorleksindex för vektorn 'fraktion'
fin=min(fraktion);
grov=max(fraktion);

%Utifrån minsta kornstorleksindex anges övre och undre gräns på hydraulisk
%konduktivitet för den finaste fraktionen i varje lager
if fin==1 %Lera
    Kfin_min=0;
    Kfin_max=1e-9;
elseif fin==2 %Mjåla
    Kfin_min=1e-9;
    Kfin_max=1e-7;
elseif fin==3 %Finmo
    Kfin_min=1e-7;
    Kfin_max=1e-5;
elseif fin==4 %Grovmå/finsand
    Kfin_min=1e-6;
    Kfin_max=1e-4;
elseif fin==5 %Mellansand
    Kfin_min=1e-5;
    Kfin_max=1e-3;
elseif fin==6 %Grovsand
    Kfin_min=1e-4;
    Kfin_max=1e-2;
elseif fin==7 %Sand
    Kfin_min=1e-6;
    Kfin_max=1e-2;
elseif fin==8 %Fingrus
    Kfin_min=1e-3;
    Kfin_max=1e-1;
elseif fin==9 %Grovrus
    Kfin_min=1e-2;
    Kfin_max=1;
elseif fin==10 %Grus
    Kfin_min=1e-3;
    Kfin_max=1e-0;

```

```

elseif fin==11           %Stenmaterial, stenjord, blockjord,
    Kfin_min=1;          %sten, block
    Kfin_max=1;
else
    Kfin_min=NaN;
    Kfin_max=NaN;
end

%Utifrån största kornstorleksindex anges övre och undre gräns på
%hydraulisk konduktivitet för den grövsta fraktionen i varje lager
if grov==1               %Lera
    Kgrov_min=0;
    Kgrov_max=1e-9;
elseif grov==2           %Mjåla
    Kgrov_min=1e-9;
    Kgrov_max=1e-7;
elseif grov==3           %Finmo
    Kgrov_min=1e-7;
    Kgrov_max=1e-5;
elseif grov==4           %Grovmo/finsand
    Kgrov_min=1e-6;
    Kgrov_max=1e-4;
elseif grov==5           %Mellansand
    Kgrov_min=1e-5;
    Kgrov_max=1e-3;
elseif grov==6           %Grovsand
    Kgrov_min=1e-4;
    Kgrov_max=1e-2;
elseif grov==7           %Sand
    Kgrov_min=1e-6;
    Kgrov_max=1e-2;
elseif grov==8           %Fingrus
    Kgrov_min=1e-3;
    Kgrov_max=1e-1;
elseif grov==9           %Grovgrus
    Kgrov_min=1e-2;
    Kgrov_max=1;
elseif grov==10          %Grus
    Kgrov_min=1e-3;
    Kgrov_max=1e-0;
elseif grov==11          %Stenmaterial, stenjord, blockjord,
    Kgrov_min=1;          %sten, block
    Kgrov_max=1;
elseif grov==12
    Kfin_grov=1e-6;
    Kfin_grov=1e-2;
else
    Kgrov_min=NaN;
    Kgrov_max=NaN;
end

%Skapa en vektor och fil med minK och maxK för den finaste fraktionen i
%varje lager
Kfin=[B(k,1) Kfin_min Kfin_max];

```

```

Kfin_filnamn=['Kfin_' num2str(id(1)) '.txt'];
dlmwrite(Kfin_filnamn, Kfin, '-append');

%Skapa en vektor och fil med mink och maxK för den grövsta fraktionen i
%varje lager
Kgrov=[B(k,1) Kgrov_min Kgrov_max];
Kgrov_filnamn=['Kgrov_' num2str(id(1)) '.txt'];
dlmwrite(Kgrov_filnamn, Kgrov, '-append');
end

%Läs in fil med borrhålsnamn och specificera itereringslängd för subloopar
data=load('filnamn.txt');
S=size(data,1);

%Diagram med största och minsta ingående kornstorlek skapas för hela
%jordlagerföljden för varje borrhål

for k=1:S

    id=data(k,1);
    filnamn=[num2str(id) '.txt'];
    T=load(filnamn);

    y=T(:,2);
    ymax=length(y);
    borrnum=T(1,1);

    %Plotta max och min [storlek] för de ingående kornstorleksfraktionerna
    fig=figure('Color',[1 1 1]);
    spy(T(:,3:end),32,'r. ');
    set(gca,'PlotBoxAspectRatioMode','manual');
    axis fill
    grid on
    set(gcf,'OuterPosition',[360 206 835 600]);
    axis([0 15 1 ymax]);
    set(gca,'GridLineStyle',':');
    title(borrnum,'FontSize',18);
    set(gca,'XTick',[1:15]);
    set(gca,'XAxisLocation','top');
    set(gca,'XTickLabel',{'0','0,0006','0,002','0,006','0,02','0,06',...
        '0,2','0,6','2','6','20','60','200','600','2000'});
    set(gca,'YTick',[1:ymax]);
    set(gca,'YTickLabel',y);
    xlabel('Kornstorlek [mm'],'FontSize',12);
    ylabel('Djup [m'],'FontSize',12);

    set(gcf,'PaperPositionMode','auto');
    figurnamn=[num2str(id) '_2.png'];
    print(figurnamn,'-dpng');
end

%Diagram över största och minsta ingående kornstorleksfraktion baserat på

```

```
%siktkurvsinfo för borrhål från 1952 skapas
```

```
for k=1:F
```

```
id=data1952(k,1);  
siktfilnamn1952=['sikt', num2str(id),'.m'];  
D_1952=load(siktfilnamn1952);  
y=D_1952(:,2);  
ymax=length(y);  
borrnum=D_1952(1,1);
```

```
%Plotta max och min [storlek] för de ingående kornstorleksfraktionerna  
fig=figure('Color',[1 1 1]);  
spy(D_1952(:,3:end),32,'b.');
```

```
grid on  
set(gca,'PlotBoxAspectRatioMode','manual');  
axis fill  
set(gca,'GridLineStyle',':');  
title(borrnum,'FontSize',18);  
axis([0 9 1 ymax]);  
set(gca,'XTick',[1:9]);  
set(gca,'XAxisLocation','top');  
set(gca,'XTickLabel',...  
    {'0','0,074','0,15','0,30','0,59','1,17','2,36','4,70','>4,70'});  
set(gca,'YTick',[1:ymax]);  
set(gca,'YTickLabel',y);  
xlabel('Kornstorlek [mm]','FontSize',12);  
ylabel('Djup [m]','FontSize',12);  
  
set(gcf,'PaperPositionMode','auto');  
siktfignamn=['sikt',num2str(id),'.png'];  
print(siktfignamn,'-dpng');
```

```
end
```

```
%Diagram över största och minsta ingående kornstorleksfraktion baserat på  
%siktkurvsinfo från 1959 skapas
```

```
for k=1:H
```

```
id=data1959(k,1);  
siktfilnamn1960=['sikt', num2str(id),'.m'];  
A_1960=load(siktfilnamn1960);  
y=A_1960(:,2);  
ymax=length(y);  
borrnum=A_1960(1,1);  
  
fig=figure('Color',[1 1 1]);  
spy(A_1960(:,3:end),32,'m.');
```

```
grid on  
set(gca,'PlotBoxAspectRatioMode','manual');  
axis fill  
set(gca,'GridLineStyle',':');
```

```

title(borrnum, 'FontSize', 18);
axis([0 9 1 ymax]);
set(gca, 'XTick', [1:9]);
set(gca, 'XAxisLocation', 'top');
set(gca, 'XTickLabel', ...
    {'0', '0,074', '0,15', '0,30', '0,59', '1,19', '2,38', '4,76', '8,0'});
set(gca, 'YTick', [1:ymax]);
set(gca, 'YTickLabel', y);
xlabel('Kornstorlek [mm]', 'FontSize', 12);
ylabel('Djup [m]', 'FontSize', 12);

set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
siktfigurnamn=['sikt', num2str(id), '.png'];
print(siktfigurnamn, '-dpng');

```

end

## Beräkning av integrerad horisontell hydraulisk konduktivitet

```

%Läs in fil med borrhålsnamn och specificera itereringslängd för subloopar
data=load('filnamn.txt');
S=size(data,1);

```

```

%Beräkning av min- och maxmedelK baserat på alla ingående fraktioner
for k=1:S

```

```

%Tomma vektorer skapas

```

```

    Kd_min=[];
    Kd_max=[];
    totdjup=[];
    lagerdjup=[];
    minkond=[];
    maxkond=[];
    djup=[];
    minmaxAlla=[];
    C=[];
    Kd_minSUM=[];
    Kd_maxSUM=[];
    Kd_minEQ=[];
    Kd_maxEQ=[];

```

```

    id=data(k,1);
    filnamn=['kondlimits' num2str(id) '.txt'];
    C=load(filnamn);

```

```

    minkond=C(:,2);
    maxkond=C(:,3);

```

```

    %Om första jordlagret är borttaget pga överlagrad lera läggs här en
    %extra nollrad till
    if C(1,1)>0

```



```

        C=[0 0 0; C];
    end

    djup=C(:,1);           %Kolumnvektor med lagerdjup
    L=size(C,1);         %Antal jordlager i lagerföljden

    maxdjup=max(C(:,1));   %Borrhålets maxdjup

    for k=1:L-1
        lagerdjup(k)=djup(k+1)-djup(k); %Lagerdjup för lager k
    end

    C(isnan(C))=0;        %Byt ut alla NaN mot 0

    if ismember(C(end,3),0)
        C=C(1:end-1,:);
    end

    if C(1,3)==0
        C=C(2:end,:);
        lagerdjup=lagerdjup(2:end);
    end

    mindjup=min(C(:,1));
    totdjup=maxdjup-mindjup;

    F=length(lagerdjup);   %Specificera iterationslängd

    %Beräkna Ki*di, dvs hydrauliska konduktiviteten i varje lager
    %multipliserad med lagerdjupet
    for b=1:F
        Kd_min(b)=lagerdjup(b)*minkond(b);   %Min K
        Kd_max(b)=lagerdjup(b)*maxkond(b);   %Max K
    end

    Kd_minSUM=sum(Kd_min);
    Kd_maxSUM=sum(Kd_max);

    Kd_minEQ=Kd_minSUM/totdjup;
    Kd_maxEQ=Kd_maxSUM/totdjup;

    minmaxAlla=[id Kd_minEQ Kd_maxEQ];

    dlmwrite('hydrkondAlla.txt', minmaxAlla, '-append');
end

%Beräkning av min- och maxmedelK baserat på procentuellt största fraktionen
for k=1:S
    %Tomma vektorer skapas
    Kd_min=[];
    Kd_max=[];
    totdjup=[];
    lagerdjup=[];
    minkond=[];

```

```

maxkond=[];
djup=[];
minmaxStorst=[];
C=[];
Kd_minSUM=[];
Kd_maxSUM=[];
Kd_minEQ=[];
Kd_maxEQ=[];

id=data(k,1);
filnamn=['kondStorstlimits' num2str(id) '.txt'];
C=load(filnamn);

minkond=C(:,2);
maxkond=C(:,3);

%Om första jordlagret är borttaget pga överlagrad lera läggs här en
%extra nollrad till
if C(1,1)>0
    C=[0 0 0; C];
end

djup=C(:,1); %Kolumnvektor med lagerdjup
L=size(C,1); %Antal jordlager i lagerföljden

maxdjup=max(C(:,1)); %Borrhålets maxdjup

for k=1:L-1
    lagerdjup(k)=djup(k+1)-djup(k); %Lagerdjup för lager k
end

C(isnan(C))=0; %Byt ut alla NaN mot 0

if ismember(C(end,3),0)
    C=C(1:end-1,:);
end

if C(1,3)==0
    C=C(2:end,:);
    lagerdjup=lagerdjup(2:end);
end

mindjup=min(C(:,1));
totdjup=maxdjup-mindjup;

F=length(lagerdjup); %Specificera iterationslängd

%Beräkna Ki*di, dvs hydrauliska konduktiviteten i varje lager
%multipliserad med lagerdjupet
for b=1:F
    Kd_min(b)=lagerdjup(b)*minkond(b); %Min K
    Kd_max(b)=lagerdjup(b)*maxkond(b); %Max K
end
Kd_minSUM=sum(Kd_min);

```

```

Kd_maxSUM=sum(Kd_max);

Kd_minEQ=Kd_minSUM/totdjup;
Kd_maxEQ=Kd_maxSUM/totdjup;

minmaxStorst=[Kd_minEQ Kd_maxEQ];

dlmwrite('hydrkondStorst.txt', minmaxStorst, '-append');

end

%Beräkning av min- och maxmedelK baserat på finaste fraktionen
for k=1:S
%Tomma vektorer skapas
Kd_min=[];
Kd_max=[];
totdjup=[];
lagerdjup=[];
minkond=[];
maxkond=[];
djup=[];
minmaxFin=[];
C=[];
Kd_minSUM=[];
Kd_maxSUM=[];
Kd_minEQ=[];
Kd_maxEQ=[];

id=data(k,1);
filnamn=['Kfin_' num2str(id) '.txt'];
C=load(filnamn);

minkond=C(:,2);
maxkond=C(:,3);

%Om första jordlagret är borttaget pga överlagrad lera läggs här en
%extra nollrad till
if C(1,1)>0
    C=[0 0 0; C];
end

djup=C(:,1); %Kolumnvektor med lagerdjup
L=size(C,1); %Antal jordlager i lagerföljden

maxdjup=max(C(:,1)); %Borrhålets maxdjup

for k=1:L-1
    lagerdjup(k)=djup(k+1)-djup(k); %Lagerdjup för lager k
end

C(isnan(C))=0; %Byt ut alla NaN mot 0

if ismember(C(end,3),0)
    C=C(1:end-1,:);
end

```

```

if C(1,3)==0
    C=C(2:end,:);
    lagerdjup=lagerdjup(2:end);
end

mindjup=min(C(:,1));
totdjup=maxdjup-mindjup;

F=length(lagerdjup);           %Specificera iterationslängd

%Beräkna Ki*di, dvs hydrauliska konduktiviteten i varje lager
%multipliserad med lagerdjupet
for b=1:F
    Kd_min(b)=lagerdjup(b)*minkond(b);    %Min K
    Kd_max(b)=lagerdjup(b)*maxkond(b);    %Max K
end

Kd_minSUM=sum(Kd_min);
Kd_maxSUM=sum(Kd_max);

Kd_minEQ=Kd_minSUM/totdjup;
Kd_maxEQ=Kd_maxSUM/totdjup;

minmaxFin=[Kd_minEQ Kd_maxEQ];

dlmwrite('hydrkondFin.txt', minmaxFin, '-append');

end

%Beräkning av min- och maxmedelK baserat på grövsta fraktionen
for k=1:S
    %Tomma vektorer skapas
    Kd_min=[];
    Kd_max=[];
    totdjup=[];
    lagerdjup=[];
    minkond=[];
    maxkond=[];
    djup=[];
    minmaxGroov=[];
    C=[];
    Kd_minSUM=[];
    Kd_maxSUM=[];
    Kd_minEQ=[];
    Kd_maxEQ=[];

    id=data(k,1);
    filnamn=['Kgroov_' num2str(id) '.txt'];
    C=load(filnamn);

    minkond=C(:,2);
    maxkond=C(:,3);

    %Om första jordlagret är borttaget pga överlagrad lera läggs här en

```

```

%extra nollrad till
if C(1,1)>0
    C=[0 0 0; C];
end

djup=C(:,1); %Kolumnvektor med lagerdjup
L=size(C,1); %Antal jordlager i lagerföljden

maxdjup=max(C(:,1)); %Borrhålets maxdjup

for k=1:L-1
    lagerdjup(k)=djup(k+1)-djup(k); %Lagerdjup för lager k
end

C(isnan(C))=0; %Byt ut alla NaN mot 0

if ismember(C(end,3),0)
    C=C(1:end-1,:);
end

if C(1,3)==0
    C=C(2:end,:);
    lagerdjup=lagerdjup(2:end);
end

mindjup=min(C(:,1));
totdjup=maxdjup-mindjup;

F=length(lagerdjup); %Specificera iterationslängd

%Beräkna Ki*di, dvs hydrauliska konduktiviteten i varje lager
%multipliserad med lagerdjupet
for b=1:F
    Kd_min(b)=lagerdjup(b)*minkond(b); %Min K
    Kd_max(b)=lagerdjup(b)*maxkond(b); %Max K
end

Kd_minSUM=sum(Kd_min);
Kd_maxSUM=sum(Kd_max);

Kd_minEQ=Kd_minSUM/totdjup;
Kd_maxEQ=Kd_maxSUM/totdjup;

minmaxGrov=[Kd_minEQ Kd_maxEQ];

dlmwrite('hydrkondGrov.txt', minmaxGrov, '-append');

end

%Lägg ihop alla värden i en fil
kond1=load('hydrkondAlla.txt');
kond2=load('hydrkondStorst.txt');
kond3=load('hydrkondFin.txt');
kond4=load('hydrkondGrov.txt');

```

```
kond=[kond1 kond2 kond3 kond4];  
dlmwrite('ResulterandeK.txt', kond);
```

*Published with MATLAB® 7.13*