



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 15030

Examensarbete 30 hp
Augusti 2015

Betydelse av datakvalitet vid modellering av grundvatten

The Importance of Data Quality in Groundwater
Modelling

Jessica Lindmark

REFERAT

Betydelse av datakvalitet vid modellering av grundvatten

Jessica Lindmark

Grundvattenmodeller kan tillämpas inom många områden såsom hjälp vid sättningsundersökning och föroreningstransport. I många fall används dock inte modeller idag då det kräver för mycket indata. En känslighetsanalys har utförts för hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning och indatas upplösning, i tid och rum, för att undersöka vilka parametrar som påverkar resultatet mest. Ett referensfall kalibrerades fram för att utgöra utgångspunkt för de resterande försöken.

Referensfallet innehöll en markmodell skannad med laser från ett flygplan, sonderingar för den nivå som utgjorde avdelare mellan friktionsjord och lera, en bergmodell innehållande sonderingar och tolkningar, samt 19 grundvattenrör. Dessa indata skalades ned där geologisk och hydrologisk data minskades vid olika försök. Det blev tydligt att mängden informationspunkter inte var lika viktig som placering av dessa. För både geologisk och hydrologisk data är det viktigt att sprida ut sonderingspunkter och grundvattenrör samt se till att höjdpunkter inkluderas.

Generellt visade analysen att högt liggande appliceringsområden för grundvattenbildning utgör de viktigaste områdena. Detta då dessa delar inte har någon annan vattentillförsel om inte ytterligare randvillkor antas. En ändring i friktionsjordens hydrauliska konduktivitet gav en större skillnad i modellresultat än vid en lika stor förändring för hydraulisk konduktivitet i lerlagret. Störst skillnad i resultat syntes dock vid en lika stor förändring i både lerlagret och friktionsjordslagret samtidigt. Att friktionsjordens hydrauliska konduktivitet spelar stor roll för modellresultatet beror på att detta lager är det vattenförande lagret och en ändring i lerlagret utgör inte ett hinder för vattnets rörelse på samma sätt som en ändring i friktionsjordslagret.

En ändring för den hydrauliska konduktiviteten gav en mindre skillnad i modellresultat än en lika stor procentuell förändring för grundvattenbildningens storlek. Då större osäkerheter är förknippade med hydraulisk konduktivitet utfördes en utökad känslighetsanalys för denna parameter som visade att en ändring i den hydrauliska konduktiviteten gav större skillnader i resultat än en ändrad grundvattenbildning inom rimligt osäkerhetsintervall.

Nyckelord: MODFLOW, Grundvattenmodellering, Känslighetsanalys, Visual MODFLOW flex

Institutionen för Geovetenskaper; luft-, vatten- och landskapslära. Uppsala Universitet, Villavägen 16, Se-752 36 UPPSALA

ABSTRACT

The Importance of Data Quality in Groundwater Modelling

Jessica Lindmark

Groundwater modelling can be applied within many fields, such as aid for geotechnical examinations and contaminant transport. In many cases however, groundwater modelling is not used due to the need of large data quantities. A sensitivity analysis has been conducted for hydraulic conductivity, groundwater recharge and data resolution in time and space, to examine what parameters affects the result most. A reference case was calibrated to form the basis of the analysis.

The reference case was formed by a ground model scanned with laser from a plane, probes for the level dividing friction soil and clay, a base model composed by interpretations and probes for base level and 19 groundwater pipes. These data were then scaled down where geological and hydrological data were changed in different experiments. It was clear that the amount of information points was not as important as the placement of them. For both types of data it was important to spread out probe points and make sure that peaks in the topography were included.

The results generally showed that recharge areas on a higher altitude are the most important recharge areas. These areas have no other water supply unless further boundary conditions apply. A change in the hydraulic conductivity in the friction earth gave a larger difference in model results than when an equally large change in hydraulic conductivity was applied in the clay layer. The largest difference in the model result occurred when the same change was applied for both layers at the same time. The reason the hydraulic conductivity in the friction soil layer matters so much is because it is the layer through which water travels. A change in the clay's hydraulic conductivity does not pose an obstacle in the same way it does in the friction soil.

A change in the hydraulic conductivity gave a smaller change in model results than an equal percentage change in groundwater recharge. Since higher uncertainties are associated with hydraulic conductivity an extended sensitivity analysis was performed for this parameter. This analysis showed that a change in hydraulic conductivity gives rise to larger differences in model results than for a change in groundwater recharge within their reasonable uncertainty ranges.

Keywords: MODFLOW, Groundwater modelling, Sensitivity Analysis, Visual MODFLOW flex

Department of Earth Sciences. Program for air, water and landscape science. Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 UPPSALA

FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 HP och har utförts som ett avslutande moment för civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet. Arbetet är utfört på Tyréns AB under handledning av Lars Marklund, avdelningschef på mark och vattenresurser. Ämnesgranskare var Fritjof Fagerlund, universitetslektor vid Institutionen för geovetenskaper och examinator var Anna Coulson Sjöblom vid Institutionen för geovetenskaper, luft, vatten och landskapslära; Meteorologi vid Uppsala universitet. Arbetet utfördes som en del av projektet Akalla-Barkarby för den nya tunnelbanesträckningen.

Först och främst vill jag tacka Lars för all tid och engagemang. All din hjälp har varit ovärderlig för projektets framgång! Sedan vill jag tacka Caroline Landström, Jeffrey Lewis, Oskar Benderius, Karl-Martin Calestam, Bengt Johansson, Victor Enbom och Kaisa Nugin för all input och hjälp jag fått från er. Även stort tack till Anders Hamnö och Adrian Lindqvist som hjälpte mig så mycket innan jag fick byta område. Tack Maria Sävström för ditt stöd och sympati i vår gemensamma situation som exjobbare. Tack även till alla andra underbara människor på Tyréns kontor i Stockholm för att ni fått mig att känna mig som en del av gänget. Jag vill också passa på att tacka Schlumberger Water Services support team för all er hjälp med min modell. Och sist men inte minst tack till min familj, vänner och Jordan för att ni stått ut med mitt oändliga prat om grundvattenmodeller och all er hjälp med korrekturläsning.

Copyright© Jessica Lindmark och Institutionen för geovetenskaper; luft-, vatten- och landskapslära

UPTEC W 15030, ISSN 1401-5765

Digitalt publicerad vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. Uppsala 2015

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Betydelse av datakvalitet vid modellering av grundvatten

Jessica Lindmark

Grundvattenmodellering används för att kunna förutse vattens rörelse under mark. Det vatten som hittar sin väg ner i marken och fyller på det vattensystem som finns där kallas grundvattenbildning och det som påverkar hur fort vattnet kan röra sig i marken kallas hydraulisk konduktivitet. Det är dessa två parametrar tillsammans med mängden indata som har utvärderats i en känslighetsanalys. Den indata som behövs för att kunna bygga upp en modell är data om på vilken nivå de olika lagren i marken ligger, marknivå samt grundvattennivån. I det utvärderade området finns det två lager. Ett lager av lera som är svårt för vattnet att ta sig igenom och ett lager som kallas friktionsjord, som består av bland annat grus och sand, i vilket vattnet rör sig.

Referensfallet innehöll en markmodell skannad med laser från ett flygplan, sonderingar för den nivå som utgjorde avdelare mellan friktionsjord och lera, en bergmodell innehållande sonderingar och tolkningar, samt 19 grundvattenrör. En sondering är en borrhning genom marken för att se vilket material som befinner sig var ner till bergets nivå. De tolkningar som görs i bergmodellen görs utifrån de sonderingar som utförts, samt där berg kan ses med blotta ögat i marknivå, så kallat berg i dagen. Dessa indata skalades ned där mark- och grundvattendata minskades vid olika försök. Det blev tydligt att mängden informationspunkter inte var lika viktig som placering av dessa. För både mark- och vattendata är det viktigt att sprida ut sonderingspunkter och grundvattenrör samt även att se till att höjdpunkter såsom kullar och berg inkluderas.

Vid en känslighetsanalys varierar en parameter inom ett intervall och sedan analyseras det resultat som modellen skapar. I detta fall är resultatet en grundvattenyta och det som analyseras är skillnaderna i grundvattennivå. Varje fall då en parameter ändras jämförs med ett referensfall som är det fall som är så korrekt som möjligt efter förutsättningarna. På så vis kan det avgöras vilken parameter som påverkar resultatet mest.

Känslighetsanalysen visade att det påverkar mycket var grundvattenbildningen appliceras. Grundvattenbildningen kan bara ansättas på de områden där vatten kan röra sig i modellen, alltså i friktionsjord. Ju högre upp i modellen, i en sluttande modell, som ett appliceringsområde ligger desto viktigare då dessa områden är de enda som fyller på de övre delarna med vatten utan andra randvillkor. Ett randvillkor såsom konstant hydraulisk potential betyder att där detta randvillkor sätts fylls området på med vatten oavsett om grundvattenbildningen räcker till eller inte. En lika stor procentuell förändring för grundvattenbildning och hydraulisk konduktivitet visade att störst skillnad i modellens resultat fås då grundvattenbildningens storlek ändras. Då hydraulisk konduktivitet ofta är mer osäkert och återfinns inom ett större intervall än grundvattenbildningen, utfördes en utökad känslighetsanalys för den hydrauliska konduktiviteten. Denna analys visade att en ändring i den hydrauliska konduktiviteten gav större skillnader i resultat än för en ändrad grundvattenbildning inom ett representativt osäkerhetsintervall för varje parameter.

En ändring i friktionsjordens hydrauliska konduktivitet gav en större skillnad i modellresultat än vid en lika stor procentuell förändring för hydraulisk konduktivitet i lerlagret. Störst skillnad i resultat syntes dock vid en lika stor procentuell förändring i både lerlagret och friktionsjordslagret samtidigt. Att friktionsjordens hydrauliska konduktivitet spelade störst roll för modellresultatet beror på att detta lager är det lager där vattnet rör sig. En minskning i lerlagret utgjorde inte ett hinder för vattnets rörelse på samma sätt som en minskning i friktionsjordslagret. En ökning i lerlagret är fortfarande inte tillräckligt stor för att vattnet ska välja att färdas i leran också. Dock bidrar en ökning i friktionsjorden till att vattnet kan röra sig ännu lättare och mer vatten kan då röra sig i marken.

ORDLISTA

Ss	Magasinkoefficient. Beskriver hur mycket vatten som jorden kan avge till följd av komprimering av porer och expanderings av vattnet.
Sy	Vattenavgivningstal. Den del av den totala volymen vatten som kan pumpas ut ur en akvifer.
Sr	Specifik retention. Ett grundvattenmagasins möjlighet att hålla kvar vatten, så kallad vissningsgräns.
K	Hydraulisk konduktivitet. Hur lätt vatten rör sig i jorden.
Grundvattenbildning	Det vatten som fyller på grundvattenmagasin och som ger upphov till flöden i marken.
Horisont	En avgränsande nivå för ett material, till exempel marknivå eller bergsnivå.
Zon	En zon är det tredimensionella utrymmet mellan två horisonter.
Lager	Ett lager i modellen är ett rutnät som är en cell tjock. Två lager innebär att rutnätet är två celler tjockt i djupled.
MMS	Ett dataset innehållande markmodellen för marknivå och sonderingar för den nivå som delar friktionsjord och lera samt för berg.
SMS	Ett dataset innehållande sonderingar för marknivå, för den nivå som delar friktionsjord och lera samt för berg.
MMS_h	Ett dataset innehållande markmodellen för marknivå och halva mängden sonderingar för den nivå som delar friktionsjord och lera samt för berg.
BP	Ett dataset innehållande markmodellen för marknivå och sonderingar för den nivå som delar friktionsjord och lera samt en platt bergsyta på -20 i plushöjd.
Medel	Ett dataset innehållande markmodellen för marknivå och sonderingar för berg. Mellan dessa horisonter skapades en enda zon.
Randvillkor	Ett villkor som bestämmer något i en modell, ofta vid en rand.
Topprandvillkor	Ett randvillkor som gäller ovanifrån på det översta lagret.
MODFLOW	Ett modellverktyg för att beräkna grundvattenflöden.

**Inversa
Avståndsmetoden**

En metod för interpolering mellan punkter.

I dagen

I marknivå.

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	1
1.1 SYFTE OCH MÅL	1
1.1.1 Delmål	1
1.2 AVGRÄNSNINGAR.....	1
2. TEORI OCH BAKGRUND	2
2.1 JORDARTER OCH JORDARTSBESTÄMNING	2
2.2 DARCY'S LAG	3
2.3 HYDRAULISK KONDUKTIVITET	3
2.4 GRUNDVATTENBILDNING	4
2.5 GRUNDVATTENMODELLERING	6
3. METOD.....	8
3.1 MODELLEN	9
3.1.1 Konceptuell modell	9
3.1.2 Numerisk modell	12
3.2 REFERENSFALL	14
3.3 KÄNSLIGHETSANALYS.....	15
3.3.1 Hydraulisk konduktivitet	15
3.3.2 Grundvattenbildning.....	16
3.3.3 Datamängd.....	16
3.4 UTVÄRDERING.....	19
4. RESULTAT	20
4.1 REFERENSFALL	20
4.2 HYDRAULISK KONDUKTIVITET	22
4.2.1 Försök 1	22
4.2.2 Försök 2	24
4.2.3 Försök 3	26
4.2.4 Utökad känslighetsanalys för hydraulisk konduktivitet	28
4.3 GRUNDVATTENBILDNING	30
4.4 DATAMÄNGD	32
4.4.1 Försök 4 - MMS	32
4.4.2 Försök 5 - SMS.....	35
4.4.3 Försök 6 - MMSH	38

4.4.4	Försök 7 - BP.....	39
4.4.5	Försök 8 - Medel	41
4.4.6	Försök 9 - Mängden observationsobservationsrör.....	43
4.4.7	Försök 10 - Validering.....	44
4.5	ALLA FÖRSÖKEN.....	46
5.	DISKUSSION.....	48
5.1	OSÄKERHETER.....	51
6.	SLUTSATSER.....	53
7.	REFERENSER.....	53
8.	BILAGA.....	55

1. INLEDNING

Det finns flera anledningar till varför grundvattenflöden är intressanta att modellera. Grundvatten utgör en dricksvattenkälla för människor och är även viktigt för samhällsfunktioner såsom energilagring och geoteknisk stabilitet, till exempel sättningar. Grundvatten är känsligt för påverkan både gällande kvalitet och kvantitet och grundvattenmodeller är viktiga verktyg för att förstå hur grundvattnet påverkas av olika åtgärder. Något som hämmar användandet av grundvattenmodeller är att de är tidskrävande att upprätta och att de kräver mycket indata. Till följd av detta används grundvattenmodeller sällan i mindre projekt. Vidare kommer användandet av grundvattenmodeller in i projekten i ett sent skede då merparten av fältdata redan är insamlad. Då det i många projekt är begränsad tillgång till data och resurser är det därför av intresse att veta vilken indata som har störst betydelse för noggrannheten i modellresultaten.

1.1 SYFTE OCH MÅL

Detta examensarbete syftar till att hitta ett effektivt sätt att kunna omvandla mätningar och fältobservationer till användbara indata till numeriska grundvattenmodeller för att simulera en förändring för grundvattenflöde och nivå. Det som undersöks är vilka parametrar som har störst inverkan på resultatet för modellerade grundvattennivåer och hur stor betydelse indatas upplösning (i tid och rum) av dessa parametrar har för modellresultatet. Detta för att optimera användandet av grundvattenmodeller utifrån krav på noggrannhet respektive ekonomiska resurser.

1.1.1 Delmål

- Hitta en metod för att optimera hur information (hydrologisk och geologisk) kan omvandlas från insamlad fältdata och observationer till ett användbart format för MODFLOW, ett modellverktyg för att beräkna grundvattenflöden.
- Utredda vilka parametrar som har störst betydelse för modellberäkningar av grundvattennivåer.

1.2 AVGRÄNSNINGAR

I arbetet användes berg som avgränsade nivå för vattenflöde. Inget flöde skedde alltså ned i berget.

2. TEORI OCH BAKGRUND

För att kunna ställa upp en modell krävs kunskaper inom hydrologi och geologi. De är båda lika viktiga för att kunna få fram en korrekt modell men också för att kunna avgöra vilka avgränsningar och förenklingar som kan utföras.

2.1 JORDARTER OCH JORDARTSBESTÄMNING

I Sverige delas jord in efter sammansättning, viktiga geotekniska egenskaper samt efter hur de bildats (Karlsson och Hansbo, 1984). För grundvattenmodellering är den viktigaste indelningen sammansättningen. Sammansättningen klassificeras som mineraljord eller organisk jord och dessa kategoriseras sedan efter kornfraktion och kornfördelningar (Karlsson och Hansbo, 1984). För undersökt område i denna studie är mineraljorden det intressanta. Enligt Sveriges Geologiska Förenings standard, som är utarbetad i Karlsson och Hansbos rapport (1984), delas mineraljorden in i kornfraktioner enligt tabell 1. Dessa är de kornfraktioner som används för bestämning av lagerföljd vid en sondering.

Tabell 1. Kornfraktioner för mineraljord, från (Karlsson och Hansbo, 1984)

	Huvudgrupp	Kornstorlek (mm)	Undergrupper	Kornstorlek (mm)
Block- och sten- fraktioner	Block	>600	Grovblock	>2000
	Sten	600-60	Grovsten	600-200
			<u>Mellansten</u>	<u>200-60</u>
Grovjords- fraktioner	Grus	60-2	Grovgrus	60-20
	Sand	2-0,06	Mellangrus	20-6
			Fingrus	6-2
			Grovsand	2-0,6
			Mellansand	0,6-0,2
			Finsand	0,2-0,06
Finjords- fraktioner	Silt	0,06-0,002	Grovsilt	0,06-0,02
	Ler	<0,002	Mellansilt	0,02-0,006
			Finsilt	0,006-0,002
			Finler	<0,0006

För att ta reda på hur jordlagerföljden är uppbyggd tolkas resultaten från en utförd viktsondering eller en jord-bergsondering. En viktsondering är mer känslig och känner av olika strukturer vilket innebär att det går att avgöra om sonden skruvas genom lösjord, sand, lera eller friktionsjord (Svenska Geotekniska Föreningen (SGF), 1999). En jord-bergsondering borrar sig ner till berg, helst tre meter eller mer ner i berget, för att avgöra var berggrunden tar vid (SGF, 2012). Tillsammans ger dessa två sonderingsmetoder med provtagningar med ostörda prover information om hur jordlagerföljden ser ut i olika punkter och en yta kan därefter interpoleras. En provtagning kan utföras som sedan skickas till laboratorium för att bestämma jordens egenskaper, såsom hydraulisk konduktivitet (SGF och Byggnadsgeologiska Sällskapet (BGS), 2001).

2.2 DARCYS LAG

Darcys lag är applicerbar på i stort sett alla flöden Q [m^3/s] genom granulära material om och endast om flödet är laminärt (Domenico och Schwartz, 1998). Det är denna lag som ligger till grund för all grundvattenmodellering. Hydraulisk konduktivitet K [m/s], beskriver genomsläppligheten hos mediet som vattnet flödar genom (Domenico och Schwartz, 1998). Darcys lag kan också beskrivas med specifikt flöde q [m/s], se ekvation (1) där A är tvärsnittsarea [m^2], Δh är skillnaden i hydraulisk potential [m] och l är längden [m] i flödets riktning mellan de två mätpunkterna.

$$\frac{Q}{A} = q = -K \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

2.3 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Om grundvattenytans höjd och tvärsnittsarean i Darcys lag är konstanta är det enda som påverkar flödet den hydrauliska konduktiviteten. Den bestäms av materialet som vätskan flödar genom och varierar kraftigt beroende av porernas storlek. I Geoteknisk litteratur likställs ofta hydraulisk konduktivitet med jordens permeabilitet (k), alltså kapaciteten för ett material att släppa igenom en vätska under tryck, men detta är inte helt korrekt (Morris och Johnson, 1967; Batu, 1998). Den hydrauliska konduktiviteten tar även hänsyn till att vätskans egenskaper också kan påverka hur vattnet rör sig genom mediet (Domenico och Schwartz, 1998). Den dynamiska viskositeten (μ) och vätskans specifika vikt (γ) tillsammans med k bestämmer K , se ekvation 2 (Batu, 1998; Domenico och Schwartz, 1998). Där ρ är densiteten [kg/m^3] och g är gravitationen [m/s^2].

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (2)$$

För vatten vid 20°C och $0,1 \text{ MPa}$ antas ett standardvärde enligt Kestin m.fl. (1978) och Bear (1988) på $1\,002,0 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ för viskositeten. Med en densitet för 20°C vatten på $998,2 \text{ kg/m}^3$ och gravitation på $9,82 \text{ m/s}^2$ ger detta att den hydrauliska konduktiviteten kan räknas ut enligt (3).

$$K = k \cdot 9,78 \cdot 10^6 \quad (3)$$

Detta innebär att den hydrauliska konduktiviteten kan antas ungefär 10^7 gånger större än permeabiliteten. Det är därför viktigt att skilja på dessa termer inom hydrologin. Den hydrauliska konduktiviteten har sammanställts för ett antal olika material utifrån Morris och Johnsons (1967), Clapp och Hornbergers (1978), Heaths (1983) samt Domenico och Schwartzs (1998) arbeten, se tabell 2. Tabellen är sammanställd för att representera ett så stort intervall som möjligt. Medelvärdet för grus, sand, silt och lera är ett medelvärde på uppmätta värden utfört av Morris och Johnson (1967) medan de andra är medelvärden av övre och undre gräns.

Tabell 2. Hydraulisk konduktivitet [m/s] för de vanligaste bergarterna och de vanligaste jordtyperna i Sverige. Medelvärde för grus, sand, silt och lera är ett medelvärde på uppmätta värden från utförda laborationsförsök för hydraulisk konduktivitet i olika jordtyper av Morris och Johnson (1967) medan de andra är medelvärdena av övre och undre gräns

	Undre gräns (m/s)	Övre gräns (m/s)	Medel (m/s)
Sprickigt magmatiskt och metamorft berg	$8,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Osprickigt magmatiskt och metamorft berg	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$
Grus	$9,4 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
Sand	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Silt, lösjord	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Morän	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$
Lera	$3,7 \cdot 10^{-13}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$9,4 \cdot 10^{-10}$

2.4 GRUNDVATTENBILDNING

Ett grundvattenmagasin skulle snabbt tömmas om ingen tillförsel av vatten skedde. Grundvattenbildningen i Sverige skapas till störst del av nederbörden (Rodhe et al., 2006). All nederbörd som faller bildar inte grundvatten utan marken måste först vara mättad till fältkapaciteten, som är olika för olika jordar, för att marken ska avge vatten till grundvattnet (Aschonitis et al., 2013). Dessutom sker evaporation från ytan och transpiration från växter, förkortat evapotranspiration.

Allt grundvatten kan inte utnyttjas utan ett grundvattenmagasin har en viss möjlighet att hålla kvar vatten, så kallad vissningsgräns eller specifik retention (S_r) (Heath, 1983). Den del av den totala volymen vatten som kan pumpas ut genom fri dränering från en öppen akvifer ges av vattenavgivningstalet (S_y). Båda dessa två mäts i procent av den totala vattenvolymen i marken, se tabell 3 för S_y .

Tabell 3. Vattenavgivningstalet för tidigare nämnda jordtyper. Ett medelvärde för huvudgruppen grus, sand och morän har skapats. Från Morris och Johnson (1967)

	S_y (%)		S_y (%)
Grovgrus	23		
Mediumgrus	24	Grus	24
Fingrus	25		
Grovsand	27		
Mediumsand	28	Sand	26
Finsand	23		
Silt	8	Silt	8
Lera	3	Lera	3
Siltig morän	6		
Sandig morän	16	Morän	12,7
Grusig morän	16		

Magasinkoefficienten (S_s) beskriver hur mycket vatten som jorden kan avge till följd av komprimering av porer och expanderings av vattnet (Domenico och Schwartz, 1998). Det är dock minskningen i porvolym som avgör hur mycket vatten som kan avges (Domenico och Schwartz, 1998). Detta gäller för slutna akviferer. För öppna akviferer dominerar S_y . Utifrån Batu (1998) samt Domenico och Schwartz (1998) har en tabell över magasinkoefficient sammanställts, se tabell 4.

Tabell 4. Magasinkoefficient i m^{-1} för ett antal jordtyper. Från Batu (1998) och Domenico och Schwartz (1998)

	Undre gräns (1/m)	Övre gräns (1/m)
Plastisk lera	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Styv lera	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Medelhård lera	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Lös sand	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Kompakt sand	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Kompakt sandigt grus	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Sprickigt berg	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
Osprickigt berg		$< 3,3 \cdot 10^{-6}$

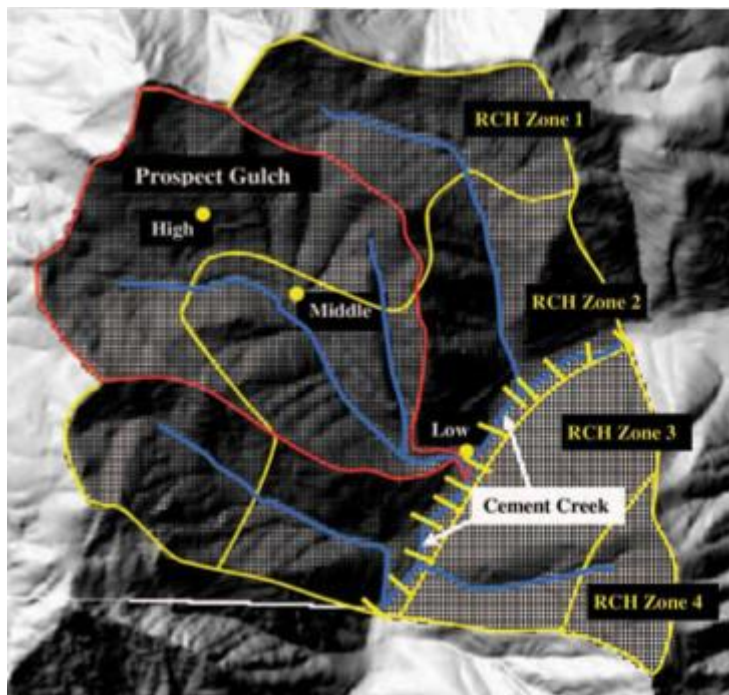
2.5 GRUNDVATTENMODELLERING

Vid grundvattenmodellering krävs information om olika parametrar som påverkar grundvattenflödet i marken. Först och främst byggs en konceptuell modell. Syftet med en konceptuell modell är att förenklat beskriva verkligheten (Anderson och Woessner, 1992). För detta behövs data för topografi, geologi, typ av akvifer och dess tjocklek samt akviferens gränser (Anderson och Woessner, 1992; Kumar, 2015). I geologin ingår information om jordlagerföljd och den hydrauliska konduktiviteten. Utöver denna information krävs kunskap om hydrologin i området. Detta inkluderar grundvattennivåer, typ och utbredning av inströmningsområden, grundvattenbildning, typ och utbredning av utströmningsområden samt grundvattenutströmningen (Anderson och Woessner, 1992; Kumar, 2015). Olika mycket information behövs beroende på målet med modelleringen (Anderson and Woessner, 1992). Vanligtvis används de uppmätta grundvattennivåerna över tid och rum för kalibrering. Yan och Burbey (2008) hävdar dock att användning av sättningsdata kan ge en bättre estimering av parameterar vid kalibrering av modellen. Yan och Burbey (2008) menar vidare att det ofta är otillräckligt att endast använda uppmätta grundvattennivåer för att korrekt kunna kalibrera en modell utan vanligen behövs också information om till exempel flödes hastighet eller transportdata. Yan och Burbey (2008) erkänner dock att användandet av olika indata med olika enheter gör arbetet mer komplext och svårhanterligt.

Utifrån den konceptuella modellen byggs ett nät. Detta nät bör innehålla så få inaktiva celler som möjligt, då dessa tar upp datalagringsutrymme, och x , y och z bör följa riktningar för K i x -, y - och z -led (Anderson och Woessner, 1992). I MODFLOW används finita differenser för att beräkna flödesförändringar vilket innebär att ett nät måste vara rektangulärt för att beräkningarna ska utföras (Hesch, 2013). Inaktiva celler uppstår i de områden i nätet som inte täcks av modellområdet, då området är oregelbundet till skillnad från nätet som är rektangulärt. Även om inaktiva celler inte används i det slutgiltiga resultatet tar de upp arbetsminne. För att optimera modelleringstiden bör nätet ha precis så hög upplösning som modellen kräver, detta kan innebära att vissa områden kring till exempel observationsrör kan behöva förfinas (Anderson och Woessner, 1992). Utifrån detta nät byggs sedan en numerisk modell upp.

Då Johnson (2007) utförde en känslighetsanalys för en modell över ett bergsområde kom han fram till att den känsligaste parametern var grundvattenbildning i grundvattenbildningszon 1, följt av den hydrauliska konduktiviteten i alla lager och därefter grundvattenbildningen i grundvattenbildningszon 2. Zon 1 var det högst belägna, i modellen liggande, grundvattenbildningsområdet och zon 2 låg nedströms zon 1, se figur 1. Han ansåg efter sin studie att de viktigaste data var den från observationer från högt belägna grundvattenrör. Enligt Marklund (2009) är grundvattenytan generellt sett benägen att följa topografin i Sverige. Detta gäller på de platser med humida klimat där nederbörden är hög relativt till jordlagrens infiltrationsförmåga. Vidare anger Marklund att för områden med grunda jordlager och berg med låg genomsläpplighet kan topografin användas som ett randvillkor, annars är det viktigt att använda grundvattenbildningen.

Det finns såklart undantag, i till exempel en rullstensås kan grundvattenytan ligga långt under marknivå.

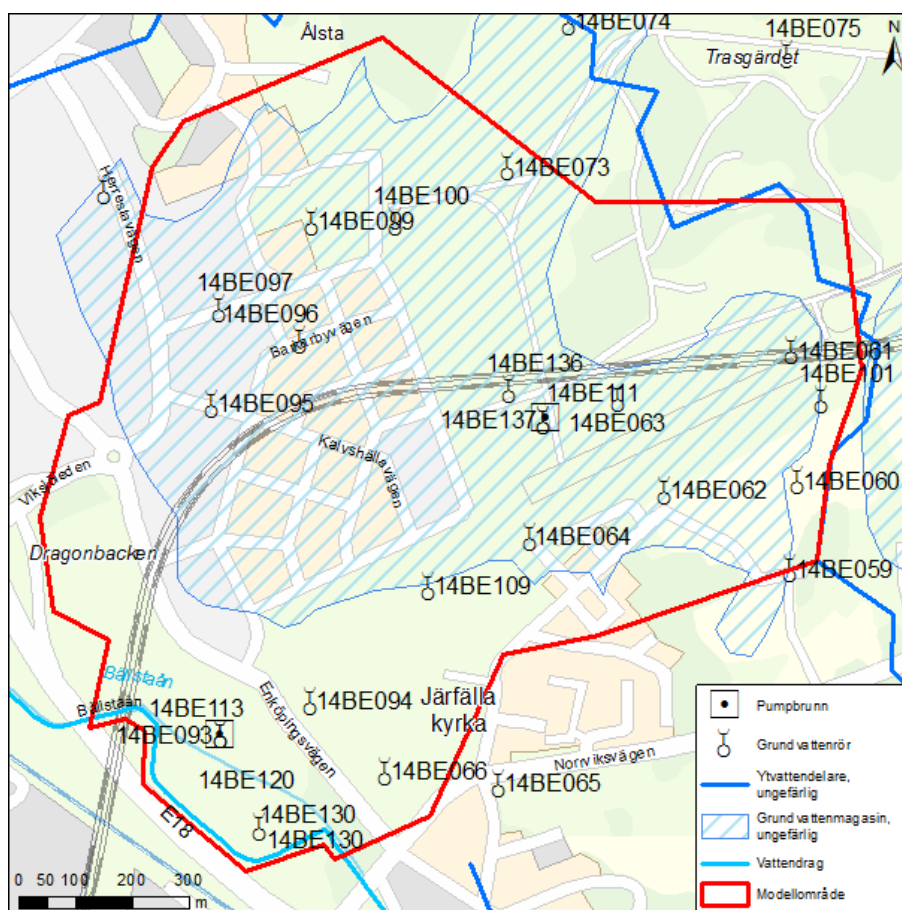


Figur 1. Grundvattenbildningsområden enligt Johnsons studie för ett bergsområde. De gula linjerna avgränsar de olika grundvattenbildningszonerna. Med tillstånd från Johnson (2007).

3. METOD

För att kunna avgöra vilken data som påverkar modellen mest utfördes en känslighetsanalys för hydraulisk konduktivitet i olika lager, grundvattenbildning och mängden data. Då alla parametrarna har olika osäkerhet utfördes även en utökad känslighetsanalys för den hydrauliska konduktiviteten. Att detta endast utfördes för hydraulisk konduktivitet var för att intervallet i känslighetsanalysen kan anses representativt för det spann som grundvattenbildningen befinner sig i men inte för den hydrauliska konduktiviteten.

Det modellerade området ligger i Akalla Barkarby och är 1,35 km² stort. Inom modellområdet finns ett vattendrag, ett grundvattenmagasin och 22 grundvattenrör varav data erhöles för 19 av dessa, se figur 2. Området är svagt kuperat med en sluttning mot sydvästra hörnet. Ett nytt bostadsområde ska byggas samt en ny tunnelbanelinje med två stationer inom området. Området består av ett tjockt lager lera samt en friktionsjordszon av varierande mäktighet. Friktionsjordszonens mäktighet ökar längre ned i sluttningen mot ån. År 2014 var nederbörden 600 mm/år och avdunstningen 400 mm/år (SMHI, 2014, u.d.).



Figur 2. Modellområdet med dess vattendrag Bällstaån samt grundvattenrör, grundvattendelare och grundvattenmagasin. © Lantmäteriets Medgivande R7341_150005.

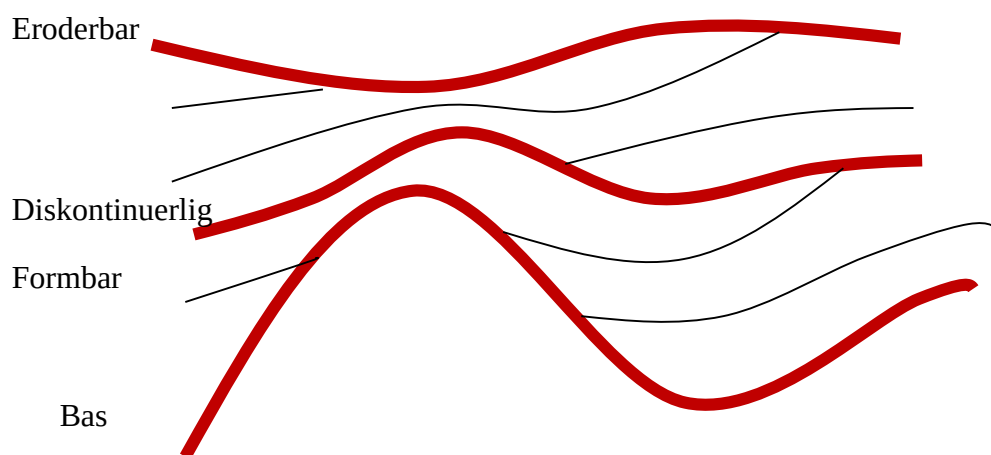
Data tillhandahölls av Tyréns AB. Dessa data behandlades sedan i Arcmap 10.2 och Excel för att skapa filer som kunde användas i Visual MODFLOW flex. Ett referensfall skapades utifrån de uppmätta värdena i fält samt en rimlig grundvattenbildning.

3.1 MODELLEN

I Visual MODFLOW flex skapades först en konceptuell modell och därefter en numerisk modell utifrån den konceptuella.

3.1.1 Konceptuell modell

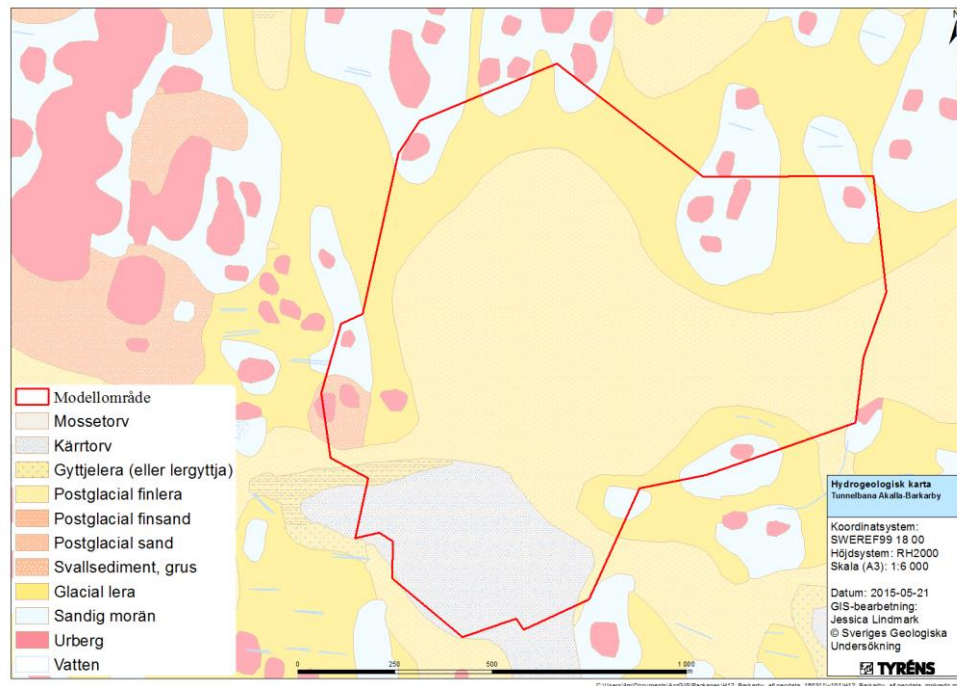
Först hämtades data i punktform för marknivå, bergnivå och den nivå som delar lera och friktionsjord samt grundvattennivåer. Utifrån dessa punkter interpolerades ytor fram, så kallade horisonter, med hjälp av inversa avståndsmetoden. Därefter angavs i vilken ordning de olika nivåerna kommer och vilken typ varje horisont är. I modellen kunde varje horisont sättas till antingen eroderbar, formbar, diskontinuerlig och bas. Eroderbar motsvarar en nivå som bryter av alla underliggande lager, formbar är ett formbart material som lera som böjer sig för de övriga bestämmande nivåerna, diskontinuerlig bestämmer hur alla formbara nivåer ska brytas och bas är berg som utgör den nedersta bestämmande nivån, se figur 3. Detta avgör hur modellen bygger upp området och ger information till det nät som sedan skapas för den numeriska modellen. Marknivån ansattes till eroderbar, lera och friktionsjordsnivån till formbar och berg till bas enligt de regler som finns för horisonter.



Figur 3. Varje nivå har en egenskap som bestämmer hur modellen ska byggas. Eroderbar är översta nivån, bas nedersta, diskontinuerlig är en bestämmande nivå i mitten och formbar följer alla andra lager varav nedersta bestämmer över den övre.

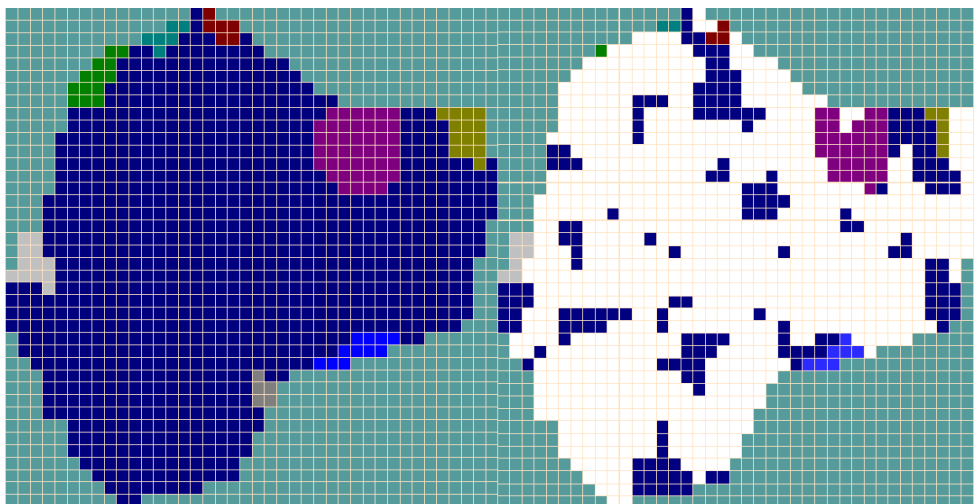
Modellen delades upp i två zoner i djupled, en lerzon och en friktionsjordszon. Anledningen till att modellen endast delades upp i två zoner var att en provpumpning, se figur 2 för utförd plats, ger ett värde på den hydrauliska konduktiviteten för hela den vattenförande zonen, friktionsjorden, och inte endast för till exempel ett grus- eller sandlager. Vid uppbyggnad av den konceptuella modellen ansattes den hydrauliska konduktiviteten för lera till $5,65 \cdot 10^{-10}$ m/s som uppmätts i laboratorium samt till $6,94 \cdot 10^{-5}$ m/s i friktionsjorden vilket var ett medelvärde av utförda pumptester. Sju tester analyserades för lerans hydrauliska konduktivitet och även om värdet skiljde sig något åt

var det mycket lika för de olika punkterna. Detta gjorde att en förenkling till en homogen lera antogs. Detsamma gällde för de olika pumptesterna och då en homogen modell är enklare att modellera bestämdes även detta lager vara homogent. Modellen skapade ett enda tjockt lerlager vilket inte stämmer överens med Sveriges Geologiska Undersöknings (SGU) jordartskarta över friktionsjord i dagen, alltså som kan ses med blotta ögat i marknivå, se figur 4.



Figur 4. Jordartskarta för det analyserade modellområdet, med tillstånd från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU).

Då området inte bestod av ett heltäckande lerlager skapades områden med friktionsjord i dagen i lager 1 efter sandig morän enligt jordartskartan, se figur 4 och figur 5. Då varje område med friktionsjord i dagen enligt jordartskartan läggs in som ett eget område i modellen får de en egen färg. Berg i dagen som också ses i jordartskartan har inte tagits hänsyn till då dessa områden inte antas utgöra ett hinder för flödet i modellen på grund av dess storlek. Vattenavgivningstalet och magasinkoefficient ansattes till standard i modellen som är på 20 % respektive $1 \cdot 10^{-5}$ 1/m.



Figur 5. I lager 1 (vänster) representerar de mindre färgade områdena de områden som är friktionsjord i dagen baserat på SGUs jordartskarta. De olika färgerna är olika konduktivitetsszoner där den mörkblå representerar lera medan de andra är friktionsjord. Vissa av dessa områden finns även representerade i lager 2 (höger) där även vitt representerar friktionsjord.

Ån modellerades som konstant hydraulisk potential, döpt till CH1, vars nivå följer marknivån då det inte fanns någon information om åns egenskaper. Dessutom hjälper konstant hydraulisk potential till med att både dränera modellen och fylla på den om det behövs, vilket är bra då nivån för ån i stort sett följer marknivån. Grundvattenbildningen applicerades endast på de områden där friktionsjorden går i dagen i lager 1, se figur 6. Enligt Rodhe et al. (2006) sker den mesta grundvattenbildningen av perkolation av nederbörd och kan i många fall förenklas till nederbörd minus evapotranspiration. I detta fall fungerar inte detta då lera utgör största delen av översta lagret, vilket är i stort sett ogenomträngligt för vatten, och då modellen inte kan ta hänsyn till ytavrinning. Grundvattenbildningen kalibrerades därför utifrån antagandet att den uppmätta hydrauliska konduktiviteten och konstant hydraulisk potential var korrekta. Grundvattenbildningen i lager 1 ansattes endast i de områden som hade kontakt med friktionsjorden i lager 2 och inte inneslöt av lera. Då modellen inte kan ta hänsyn till ytavrinning skulle applicering av grundvattenbildning i områden som inte kan dräneras till resten av modellen innebära att dessa områden skulle få en alldeles för hög hydraulisk potential och de skulle då svämma över.

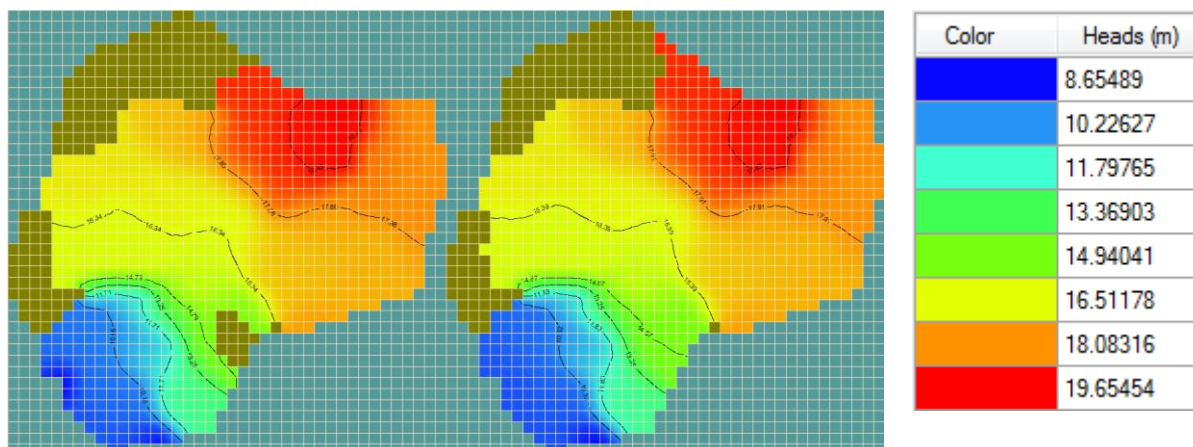


Figur 6. Randvillkoren består av två konstanta hydrauliska potentialer (röda linjer) och åtta grundvattenbildningsområden. Alla är topprandvillkor. Konstant hydraulisk potential 1 ligger i sydvästra delen av modellen och konstant hydraulisk potential 2 i nordöstra. Längs övriga ränder antas att inget flöde sker.

3.1.2 Numerisk modell

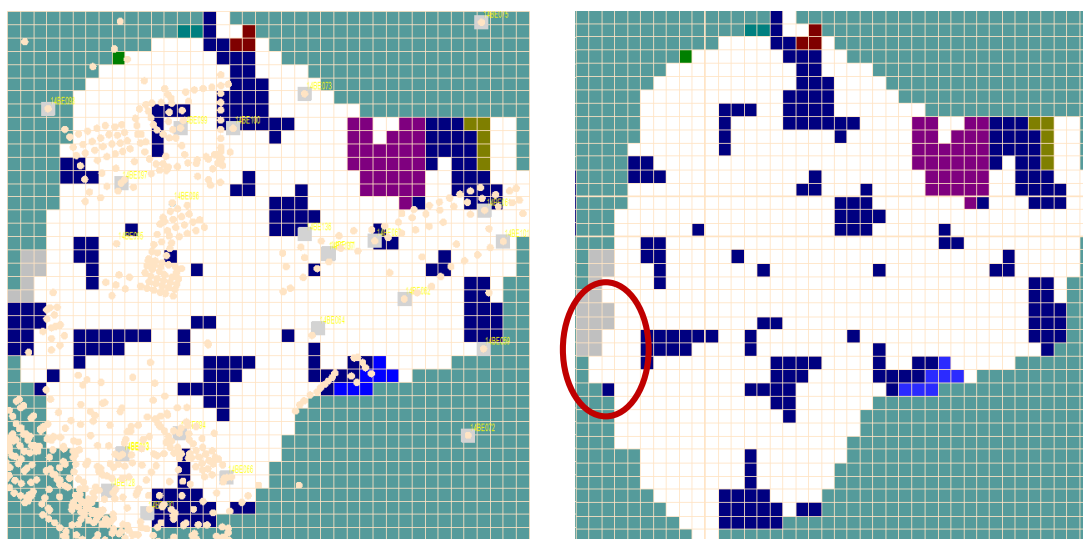
För modellering användes MODFLOW-2005 för ett nät med nätstorleken 40x40 med minsta tjocklek på 0,001 m. Detta då vissa områden av friktionsjord är väldigt tunna och för att de regler som gäller för de nivåtyper som valdes för mark, friktionsjord och lera samt berg skulle gälla. Nätets storlek var det största tillåtna med modellens valda horisonter. En upplösning på 40x40 gav en cellstorlek på 36,9 m i x- och y-led vilket kan anses vara en relativt låg upplösning. En högre upplösning hade varit att föredra men modellens horisontregler tillät inte ett större nät. En noggrannhet på 10^{-6} användes vid modellering av resultatet med maximalt möjliga antal yttre iterationer på 1000 och 250 för maximalt antal inre iterationer.

Vid kalibrering upptäcktes att modellen tycktes svämma över i den östra delen och vatten rinna längs kanten mot CH1, se figur 7. Vid närmare undersökning låg utmärkt grundvattendelare i kartan i en sluttning i grundvattenytan mot det magasin som var utritat till höger i modellen, se figur 2. Då en grundvattendelare alltid befinner sig i grundvattenytans högsta punkt infördes en konstant hydraulisk potential 2, CH2, för att kunna dränera högra sidan för att representera ett fall mot magasinet till höger om modellområdet, se figur 6. CH 2 skapades efter observationsrören 14BE075, 14BE061, 14BE101 och 14BE059 i kartan, se figur 2, och följde en grundvattenyta som interpolerats fram i Visual MODFLOW flex utifrån de uppmätta grundvattenrören. CH2 innebar att ett flöde kunde ske över randen som annars har randvillkoret inget flöde.



Figur 7. Vid kalibrering översvämmades östra sidan och flödet skedde längs med högra kanten ned mot CH1. Detta kan ses genom att följa flödeslinjernas riktning.

Det upptäcktes också att vattnet fastnade på vissa lerpartier på grund av områden med för låg hydraulisk konduktivitet som hindrar flödet. Modellen interpolerar fram ytorna utifrån inmätta punkter och då inga mätpunkter fanns i celler där uppdämning skedde ändrades den hydrauliska konduktiviteten manuellt, från lera till friktionsjord, för att motverka denna uppdämning, se figur 8.



Figur 8. Mätpunkter (beigea) för lera och friktionsjord i lager 2 (figur till vänster) där vissa celler utgör ett hinder för flödet (till vänster). Två ändringar har skett (figur till höger) i sydvästra och västra delen av modellen i lager 2 (röd ring) som nu fått grå och vit färg (friktionsjord) istället för mörkblå (lera). Detta betyder att leran (mörkblå) inte längre innebär ett hinder för flödet i dessa områden.

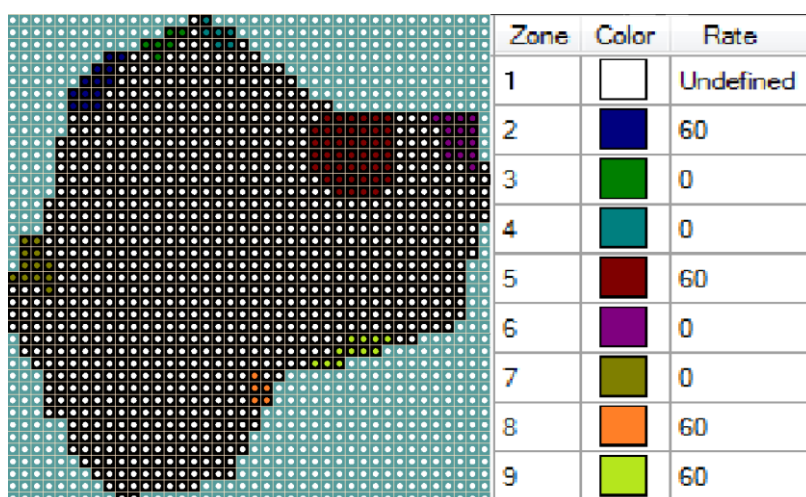
3.2 REFERENSFALL

Ett referensfall skapades utifrån största mängd tillgänglig data. Markytan skapades av en markmodell baserat på laserskanning med flygplan. Bergytan skapades utifrån en bergmodell som skapats genom sondering och tolkning. Tolkningen innebär att utifrån den information som finns från sonderingar och där berg i dagen har betraktats har ytterligare informationspunkter kunnat interpoleras fram. Markmodellen täcker hela modellområdet och ger en väldigt korrekt bild av områdets topografi medan bergmodellen innehåller en viss osäkerhet där sonderingspunkter saknas, se figur 9. Lerytan skapades utifrån befintliga sonderingspunkter för lera och friktionsjord då mer data ej fanns tillgängligt.



Figur 9. Datapunkter för bergnivå (röd), ler- och friktionsjordsnivå (grön) samt marknivå (blå) för referensfallet.

Efter kalibrering erhöles $1,02 \cdot 10^{-7}$ m/s i hydraulisk konduktivitet för leran medan friktionsjorden behöll sitt startvärde på hydraulisk konduktivitet, $6,94 \cdot 10^{-5}$ m/s. Grundvattenbildningen med dessa parametervärden var 60 mm/år och ansattes på fyra av områdena i översta lagret, se figur 10. Endast dessa fyra områden var hopkopplade med angränsade celler i det stora friktionsjordsområdet i lager 2 och kunde därför dräneras.



Figur 10. Grundvattenbildningen applicerades endast på fyra av åtta områden. Färgtabellen till höger i bilden visar vilka av de åtta områden som grundvattenbildningen på 60 mm/år applicerades på.

3.3 KÄNSLIGHETSANALYS

En känslighetsanalys utfördes för att undersöka vilken parameter som påverkar resultatet mest. Tre parametrar undersöktes: hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning och mängden indata.

3.3.1 Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten ändrades i referensmodellen i steg om +10 %, +50 %, +100 %, -10 % och -50 %. I försök 1 ändrades den hydrauliska konduktiviteten endast i lerlagret, i försök 2 i friktionsjorden och i försök 3 ändrades den i både leran och friktionsjorden samtidigt, se tabell 5.

Tabell 5. Känslighetsanalys av hydrauliska konduktiviteten i lerlager och friktionsjorden. I försök 1 ändrades endast lerans hydrauliska konduktivitet medan i 2 ändrades friktionsjordens hydrauliska konduktivitet och i 3 ändrades den i bägge

Försök	Jordart	Ursprungligt K	10 %	50 %	100 %	-10 %	-50 %
1	Lera	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,12 \cdot 10^{-07}$	$1,53 \cdot 10^{-07}$	$2,04 \cdot 10^{-07}$	$9,16 \cdot 10^{-08}$	$5,09 \cdot 10^{-08}$
	Friktionsjord	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$
2	Lera	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$
	Friktionsjord	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$7,63 \cdot 10^{-05}$	$1,04 \cdot 10^{-04}$	$1,39 \cdot 10^{-04}$	$6,25 \cdot 10^{-05}$	$3,47 \cdot 10^{-05}$
3	Lera	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,12 \cdot 10^{-07}$	$1,53 \cdot 10^{-07}$	$2,04 \cdot 10^{-07}$	$9,16 \cdot 10^{-08}$	$5,09 \cdot 10^{-08}$
	Friktionsjord	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$7,63 \cdot 10^{-05}$	$1,04 \cdot 10^{-04}$	$1,39 \cdot 10^{-04}$	$6,25 \cdot 10^{-05}$	$3,47 \cdot 10^{-05}$

Då den hydrauliska konduktiviteten är den osäkraste parametern, utfördes en utökad känslighetsanalys för just denna parameter. Ofta återfinns den hydrauliska konduktiviteten inom ett intervall på tre tiopotenser. Tre försök utfördes där först endast leran utvärderas för ett intervall på 10^{-6} till 10^{-8} , sedan friktionsjorden med ett intervall på 10^{-4} till 10^{-6} och sist de båda intervallen tillsammans, se tabell 6.

Tabell 6. Experimentuppställning för de olika försöken genom att öka och minska med en tiopotens för hydraulisk konduktivitet. I försök 1 utvärderades endast leran i försök 2 friktionsjorden och sedan de båda tillsammans i försök 3

Försök	Jordart	Ursprungligt K	10^{-1}	10^1
1	Lera	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-08}$	$1,02 \cdot 10^{-06}$
	Friktionsjord	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-05}$
2	Lera	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$
	Friktionsjord	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-06}$	$6,94 \cdot 10^{-04}$
3	Lera	$1,02 \cdot 10^{-07}$	$1,02 \cdot 10^{-08}$	$1,02 \cdot 10^{-06}$
	Friktionsjord	$6,94 \cdot 10^{-05}$	$6,94 \cdot 10^{-06}$	$6,94 \cdot 10^{-04}$

3.3.2 Grundvattenbildning

Grundvattenbildningen ändrades endast i storlek i referensmodellen och inte i var den applicerades. Med utgångspunkt från referensvärdet på 60 mm/år ändrades grundvattenbildningen i steg om +10 %, +50 %, +100 %, -10 % och -50 % för att kunna jämföras med resultaten från känslighetsanalysen för hydraulisk konduktivitet, se tabell 7.

Tabell 7. Grundvattenbildningen (R) ändrades i steg för att matcha utvärdering för hydraulisk konduktivitet

Förändring (%)	Ref	10 %	50 %	100 %	-10 %	-50 %
mm/år	60	66	90	120	54	30

3.3.3 Datamängd

Sex set med geologisk indata användes för berg- och marklagret, se tabell 8. För alla seten utom det sjätte utgjorde uppmätt lerlager och friktionsjord i utförda sonderingar den nivån som delade leran och friktionsjorden. Tyvärr fanns ingen mer utförlig data för denna nivå. För de fem första seten användes samma hydrauliska konduktivitet som för referensfallet i både leran och friktionsjorden.

Tabell 8. Sex dataset med olika uppsättning utvärderades. Laser betyder den markmodell som skapats utifrån laserskanningar från flygplan. Sond betyder information från de sonderingspunkter som utvärderas på den nivån. Bergmodell är en bergmodell som skapats utifrån tolkningar och sonderingar för bergnivåer. MMS representerar markmodellen, sonderingar för friktionsjord och lera samt endast sonderingar för berg. SMS representerar mark- och bergpunkter utifrån utförda sonderingar. BP representerar MMS fast med en platt bergsyta och Medel utgörs av endast ett lager med ett medelvärde för den hydrauliska konduktiviteten. MMSh är MMS med halva mängden sonderingar

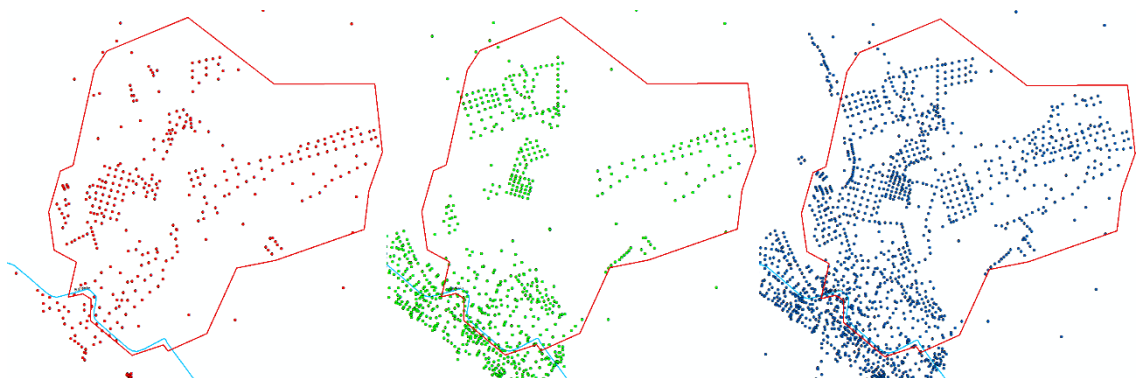
Försök	Dataset	Mark	Friktionsjord/lera	Berg
Ref	Referens	Laser	Alla	Bergmodell + sond
4	MMS	Laser	Alla	Sond
5	SMS	Sond	Alla	Sond
6	MMSh	Halva Laser	Halva	Halv bergmodell + Halva sond
7	BP	Laser	Alla	Platt på -20
8	Medel	Laser	Inga	Sond

Det första setet utgjordes av referensfallet. Det andra setet, MMS, bestod av markmodellen, sonderingar för friktionsjord och lera samt endast sonderingar för berg, se figur 11 och tabell 8.



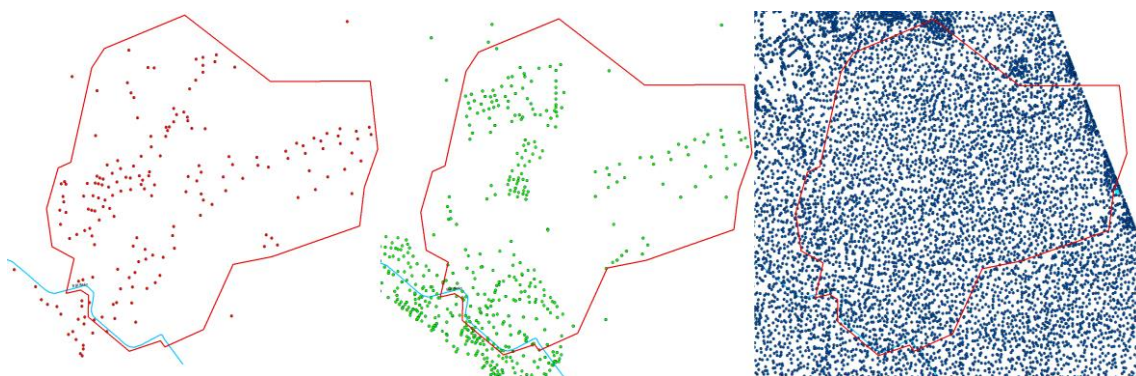
Figur 11. Datapunkter för bergsnivå (röd), ler- och friktionsjordsnivån (grön) samt marknivån (blå) för data set 2.

Det tredje setet, SMS, bestod av mark- och bergpunkter utifrån utförda sonderingar. Dessa utgör en mindre del av det modellerade området och bidrar därför till större olikheter jämfört med verkligheten, se figur 12.



Figur 12. Datapunkter för bergsnivå (röd), ler- och friktionsjordsnivån (grön) samt marknivån (blå) för data set 3.

Fjärde setet, MMSH, bestod av markmodellen och halva mängden sonderingar för friktionsjord och lera samt berg, se figur 13. Data halverades genom att välja varannan punkt i Excel-filen.

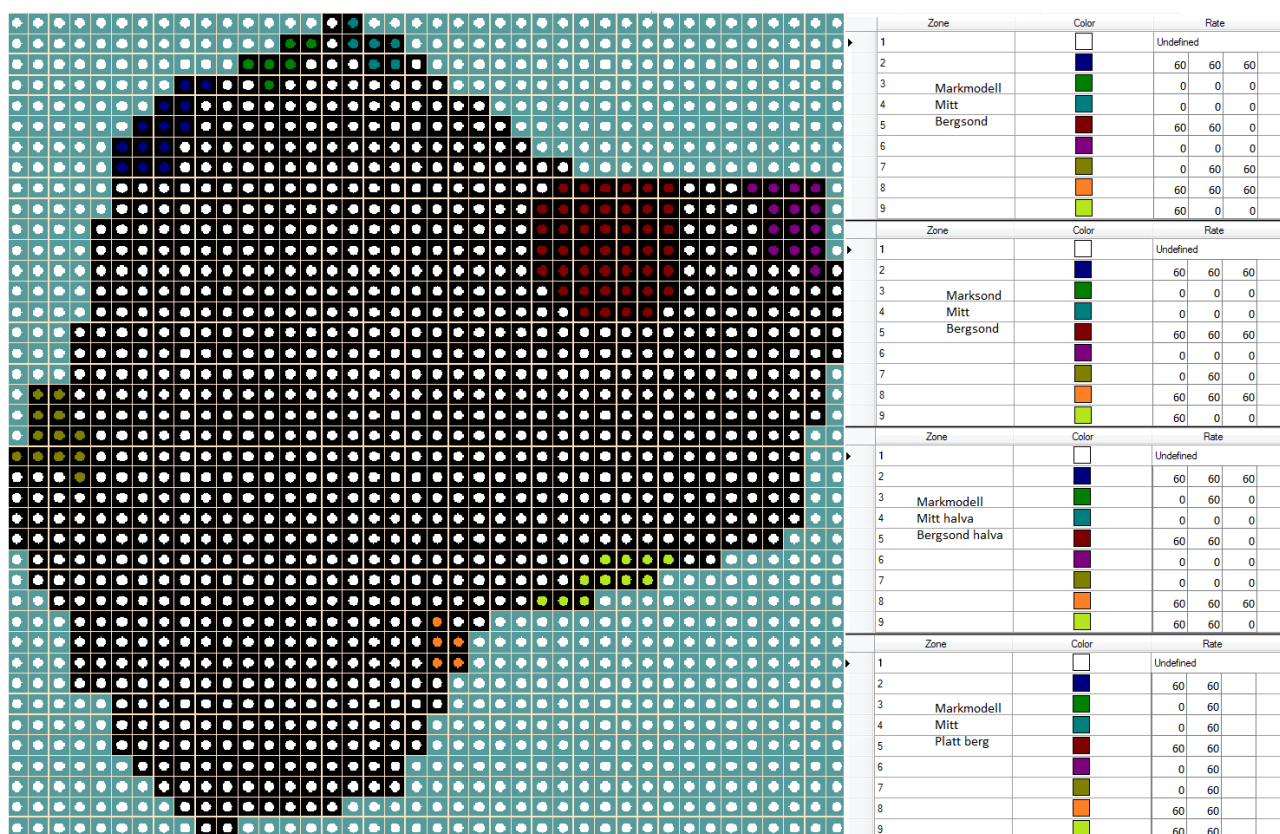


Figur 13. Datapunkter för bergsnivå (röd), ler- och friktionsjordsnivån (grön) samt marknivån (blå) för data set fyra.

Det femte setet, BP, bestod av markmodellen samt friktionsjord och lernivån tillsammans med en platt bergnivå på -20 m i plushöjd. Detta för att utvärdera om information om bergets form spelar roll.

Det sista och sjätte setet, Medel, bestod av markmodellen samt sonderingar för berg och bestod alltså av ett enda lager. För detta skapades ett medelvärde för den hydrauliska konduktiviteten i friktionsjord och lera, $1,02 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $6,94 \cdot 10^{-5}$ m/s. Detta gav en hydraulisk konduktivitet på $3,48 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Då modellerna byggs upp olika till följd av att ytorna ser olika ut, utfördes återigen en analys av var grundvattenbildning bör appliceras. För alla set utfördes första försöket med lika stor grundvattenbildning som för referensfallet och på samma områden som för referensfallet, se figur 6. För dataset två, tre och fyra ändrades var grundvattenbildningen applicerades två gånger medan detta ändrades endast en gång för set fem, se figur 14. Att appliceringen ändrades två gånger för dataset två, tre och fyra var på grund av att det fanns vissa osäkerheter i om vissa områden var kopplade till friktionsjorden eller inte. Det sjätte setet utvärderades endast med avseende på referensfallets grundvattenbildning.



Figur 14. Grundvattenbildningen applicerades på olika ställen i de fyra fallen då modellen byggdes olika. De olika försöken beskrivs med de olika grundvattenbildningsfallen till höger i figuren. De olika färgerna till höger representerar det område med respektive färg i kartan till vänster.

Antalet grundvattenrör minskades i två omgångar. Först minskades mängden grundvattenrör för referensfallet till hälften för att sedan halveras ytterligare en gång till

en fjärdedel. Dessa utvärderades endast i Referensmodellen. De två grundvattenrörfallen hämtades från referensdata från den 9 mars 2015, se tabell 9. Det halva datasetet skapades utifrån det fullständiga genom att välja vartannat observationsrör i det Excelark som innehöll informationen. Detta upprepades sedan på det halva setet för att skapa fjärdedelssetet. Modellen validerades med tre olika valideringsset från den 23 februari 2015, 23 mars 2015 och 20 april 2015. För valideringsseten ändrades CH2 till att följa den grundvattenyta som skapades utifrån data från respektive datum. Även valideringen utfördes endast i referensmodellen.

Tabell 9. Försök 9 och 10 för utvärdering av hur mängden grundvattenrör påverkar och validering av modellen med data från tre olika tillfällen

Försök	Dataset	Datum
9	Halva mängden observationsobservationsrör	9 mars 2015
	Fjärdedel av mängden observationsobservationsrör	9 mars 2015
10	Validering 1	23 februari 2015
	Validering 2	23 mars 2015
	Validering 3	20 april 2015

3.4 UTVÄRDERING

Resultatet utvärderades för hydraulisk potential i modellen efter skillnad i minsta residual, maximal residual, medelresidual, absolutmedelvärdesresidual, standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde på residualerna (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS) vilket ger ett mått på anpassningen, antal torra observationsobservationsrör inom modellområdet och korrelation mellan observerat och beräknat värde för de olika försöken. RMS beräknas med hjälp av kalibreringsresidualen R_i , som är skillnaden mellan det beräknade värdet för den hydrauliska potentialen och det observerade, samt antalet datapunkter n , se ekvation 4 (Schlumberger Water Services, 2011). NRMS är RMS normaliserat med skillnaden mellan högsta och lägsta observerade värdet för den hydrauliska potentialen, se ekvation 5 (Schlumberger Water Services, 2011).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (4)$$

$$NRMS = \frac{RMS}{(X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}} \quad (5)$$

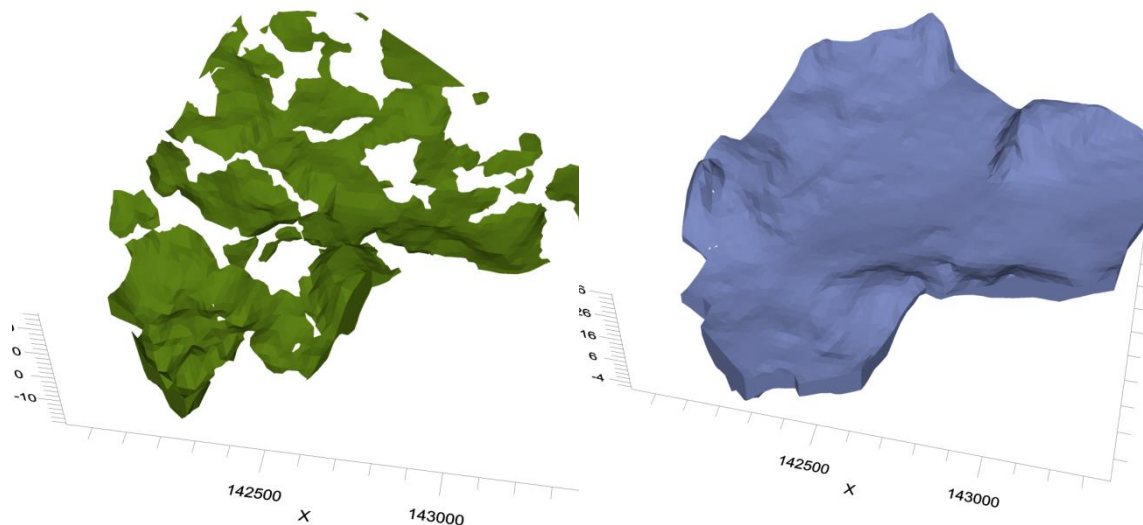
Störst fokus lades vid normaliserat kvadratisk medelvärde då detta beskriver skillnaden i det uträknade värdet och det verkliga värdet för alla punkter normaliserat med det intervall som punkterna rör sig inom. Detta mäts i procent i modellen och ett lägre värde är ett bättre värde. Korrelation ska vara så nära ett som möjligt. De rör sig alltså tillsammans så om det observerade värdet stiger, stiger också värdet för det beräknade. En negativ korrelation med storleken minus ett innebär också perfekt korrelation men i detta fall så stiger ett värde när det motsvarande minskas. Så om det observerade värdet stiger så minskar det beräknade värdet. Detta är inte önskvärt i denna studie och därför bör korrelationen vara så nära ett som möjligt. Korrelationen är kovariansen för beräknat

och observerat värde för den hydrauliska potentialen dividerat med produkten mellan standardavvikelse för beräknat och observerat värde (Schlumberger Water Services, 2011). Antalet torra observationsrör är observationsrör inom området som har blivit inaktiva, vilket betyder att de blivit torra då inget vatten finns i cellen. Ett torrt observationsrör tas inte med i de beräkningar som utgör RMS med mera och påverkar alltså hur väl det beräknade värdet stämmer överens med verkligheten. Observationsrören kommer alltid i ordningen, från vänster till höger, 14BE128, 14BE130, 14BE098, 14BE113, 14BE094, 14BE066, 14BE064, 14BE062, 14BE111, 14BE136, 14BE137, 14BE063, 14BE059, 14BE101, 14BE097, 14BE061, 14BE099, 14BE073 i grafen för observerat jämfört med beräknat värde på hydraulisk potential. Brun färg i kartorna över hydraulisk potential anger att inget vatten finns i cellen och denna utgör alltså en torr cell. För uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde för varje experiment var god se bilaga.

4. RESULTAT

4.1 REFERENSFALL

Referensfallets friktionsjordszon var tunn och illa sammankopplad, se figur 15. Endast en liten mängd vatten får plats och rörligheten är begränsad. Då lerlagret är tjockt och täcker ytan, se figur 15, antas området bestå av en sluten akvifer. En flaskhals syns i sydöstra delen som är enda sammanlänkande delen mellan de övre och nedre delarna.



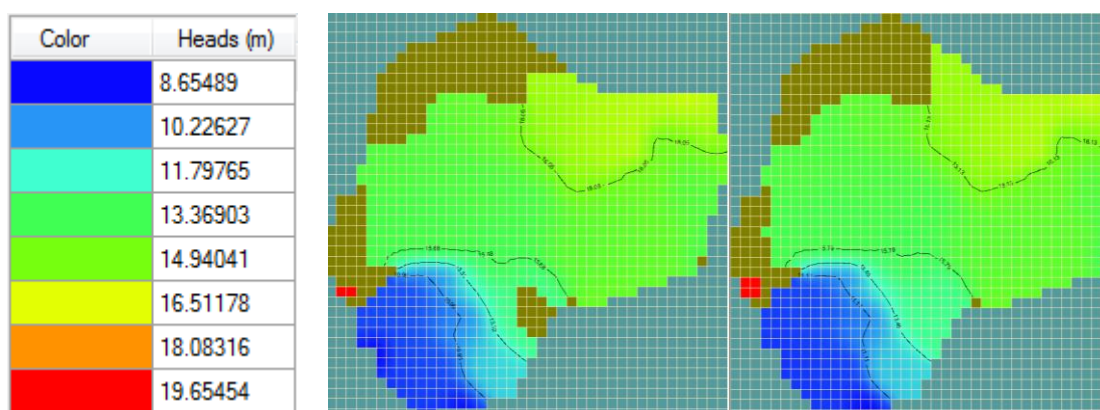
Figur 15. Friktionsjordszonen (vänster) för referensfallet är uppdelad och tunn vilket gör att lite vatten kan röra sig i zonen. Lerzonen (höger) för referensfallet innan friktionsjord i dagen introduceras utifrån jordartskarta är tjockt och täcker ytan. Även om friktionsjord i modellen placerats in enligt en jordartskarta är största delen av området täckt av lera.

Med de parametervärden som kalibrerats fram erhöles ett NRMS på 20,4 % och en korrelation på 85 %, se tabell 10. Tre av 19 observationsrör låg i det inaktiva fältet och bör därför vara inaktiva, vilket gav ett torrt observationsrör inom modellområdet, se tabell 10. Att ett observationsrör var torrt antydde att modellen inte var optimalt kalibrerad och med en NRMS på 20,4 % fanns en möjlighet till förbättring.

Trots detta kunde inte en mer optimal lösning uppnås efter kalibrering både manuellt och med hjälp av parameterestimering (PEST). Den flaskhals som tidigare nämndes antas bidra till att för höga värden modelleras fram för observationsrören i mitten av området. Vatten dämades upp i den sydvästra delen där inte all lera, som tidigare utgjorde problemet, kunde omvandlas på grund av modellområdets form, se figur 16.

Tabell 10. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för referensfallet

	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	ATO	Ko r
Referens	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85



Figur 16. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet. De röda områdena är vatten som fastnar på den lercell som lämnades kvar då den hydrauliska konduktiviteten ändrades manuellt. Lager 1 (vänster) har högre potential än lager 2 (höger).

4.2 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

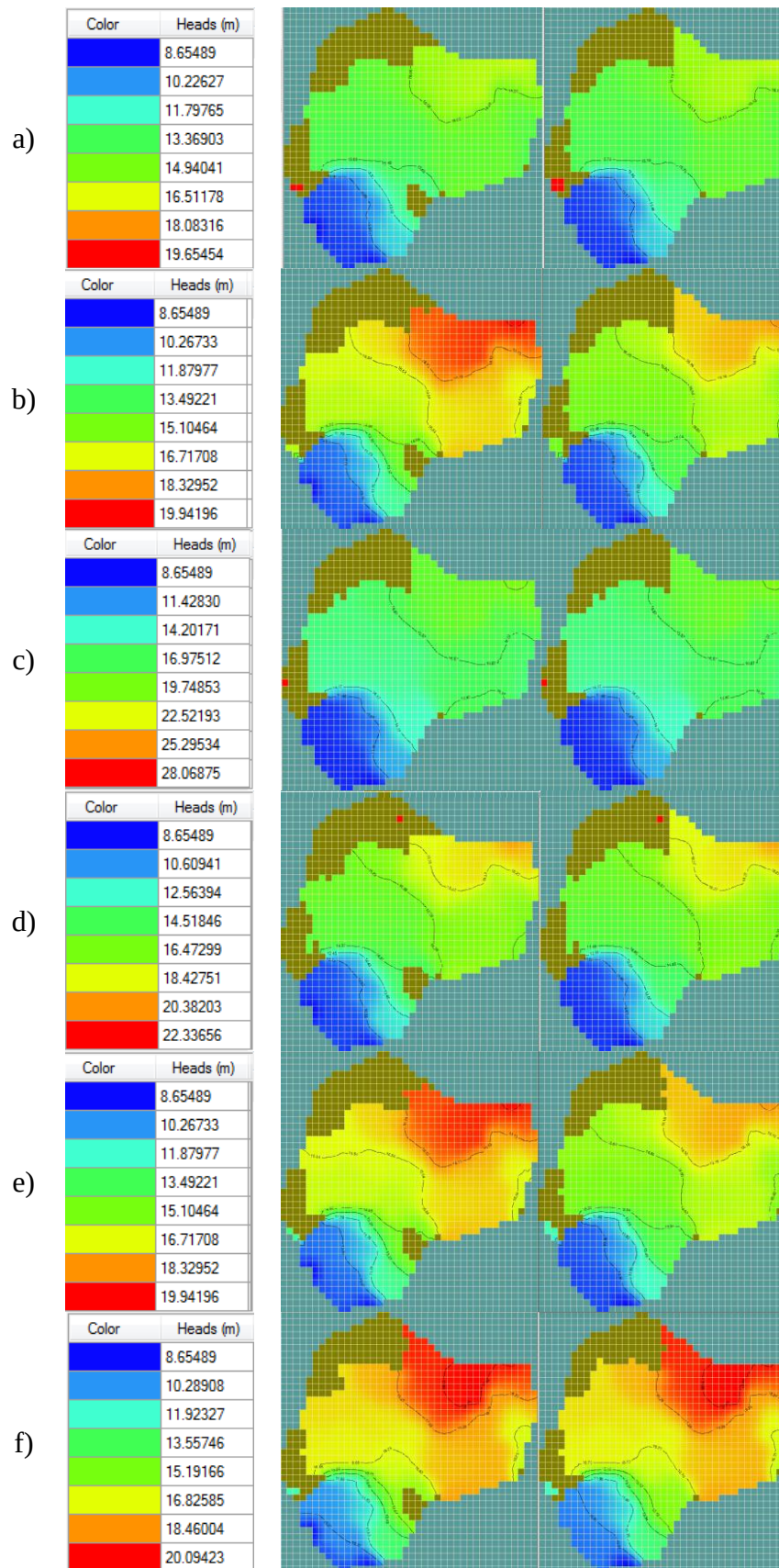
Försök 1,2 och 3 visade att friktionsjorden får störst skillnader i resultat av friktionsjord och lera men allra störst skillnad syntes då den hydrauliska konduktiviteten ändrades samtidigt i båda lagren. Detta styrktes av den utökade känslighetsanalysen för hydraulisk konduktivitet.

4.2.1 Försök 1

Då lerans hydrauliska konduktivitet ökades eller minskades, se tabell 5, förändrades inte mängden vatten i modellen avsevärt. Skalan i vattnets utbredning skiljde sig på grund av utstickare men för den större vattenkroppen var vattennivåerna de samma för de flesta fallen, se figur 17. Det var en skillnad på endast 7,6 procentenheter i NRMS då den hydrauliska konduktiviteten ändras i lerlagret, tabell 11. Korrelationen var också mycket lika för de olika fallen.

Tabell 11. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsobservationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 1 för hydraulisk konduktivitet.

Förändring	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	AT O	Kor
Ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
1 10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,0	1,7	1,8	0,4	2,4	27,9	3	0,86
50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	3,7	1,6	1,7	0,4	2,2	26,0	3	0,87
100 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	3,5	1,4	1,6	0,4	2,1	24,2	3	0,88
-10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,2	1,5	1,8	0,5	2,4	20,8	1	0,85
-50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,7	1,9	2,0	0,5	2,8	23,8	1	0,84



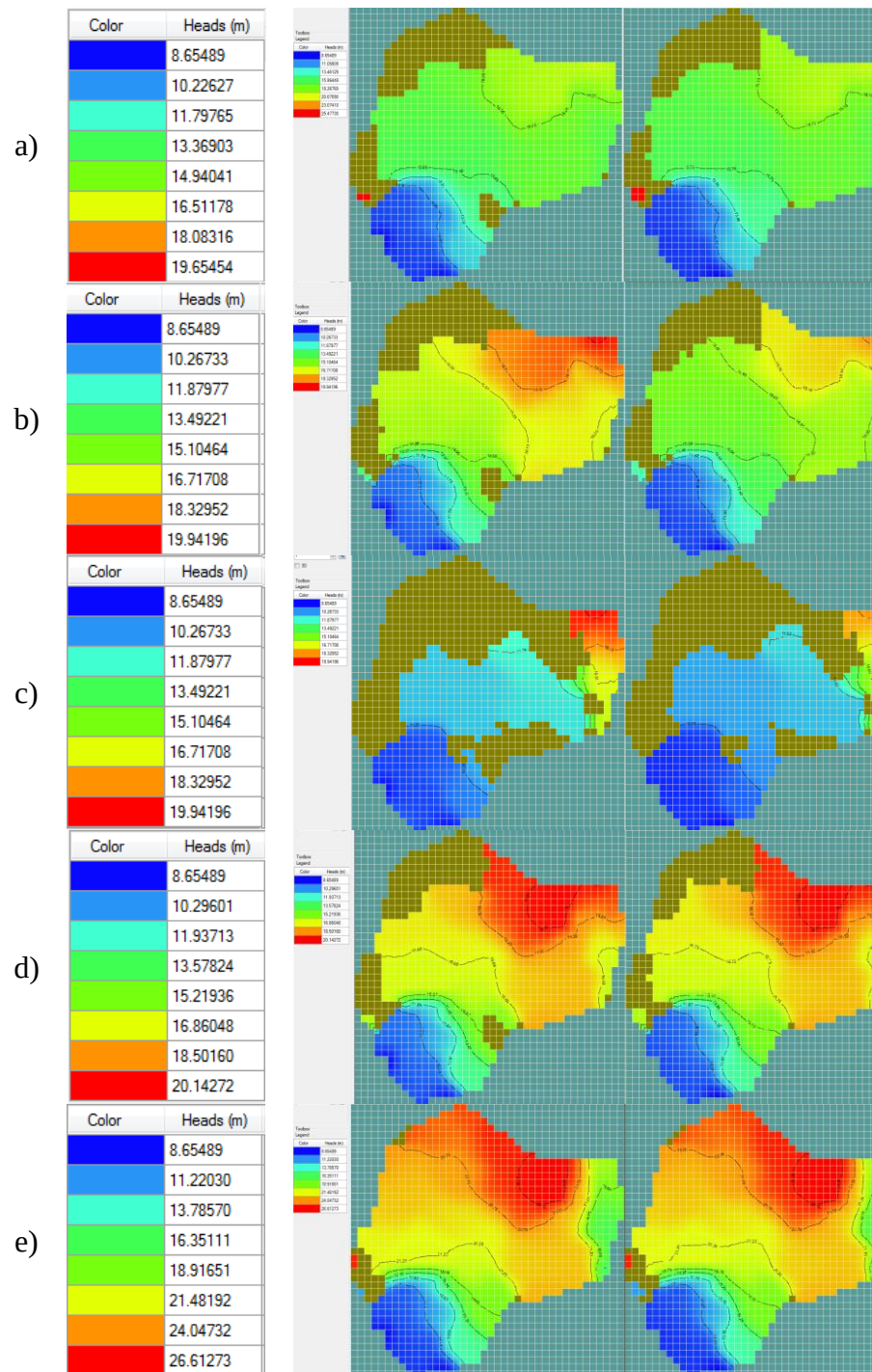
Figur 17. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a) och försök 1 med en ökning i hydraulisk konduktivitet för leran med 10 % (b), 50 % (c) och 100 % (d) samt en minskning med 10 % (e) och 50 % (f). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.2.2 Försök 2

En tydlig skillnad sågs i mängden vatten då den hydrauliska konduktiviteten ändrades i friktionsjorden. Detta var det vattenförande lagret och då den hydrauliska konduktiviteten minskas med 50 % så ökade mängden vatten i området markant och utbredningen likaså, se figur 18. Den största skillnaden i NRMS då den hydrauliska konduktiviteten ändras i friktionsjorden var 32,5 procentenheter, se tabell 12. Korrelationen skiljde sig också kraftigare för försök 2 med ett spann på 14 procentenheter.

Tabell 12. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk (NRMS), antal torra observationsobservationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 2 för hydraulisk konduktivitet. Försök 2 för 100 % ökning i friktionsjord blev torr och visade inga resultat. Rött med stjärna indikerar att resultatet är missvisande

Förändring		Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RM S [m]	NRMS [%]	ATO	Kor
	Ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
2	10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	3,6	1,5	1,7	0,4	2,1	25,3	3	0,88
*	50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-3,2	-0,8	1,0	0,3	1,5	18,3	4	0,90
	100 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,6	1,8	1,9	0,5	2,7	22,9	1	0,84
	-50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	10,0	4,7	4,7	0,9	6,1	52,8	0	0,76



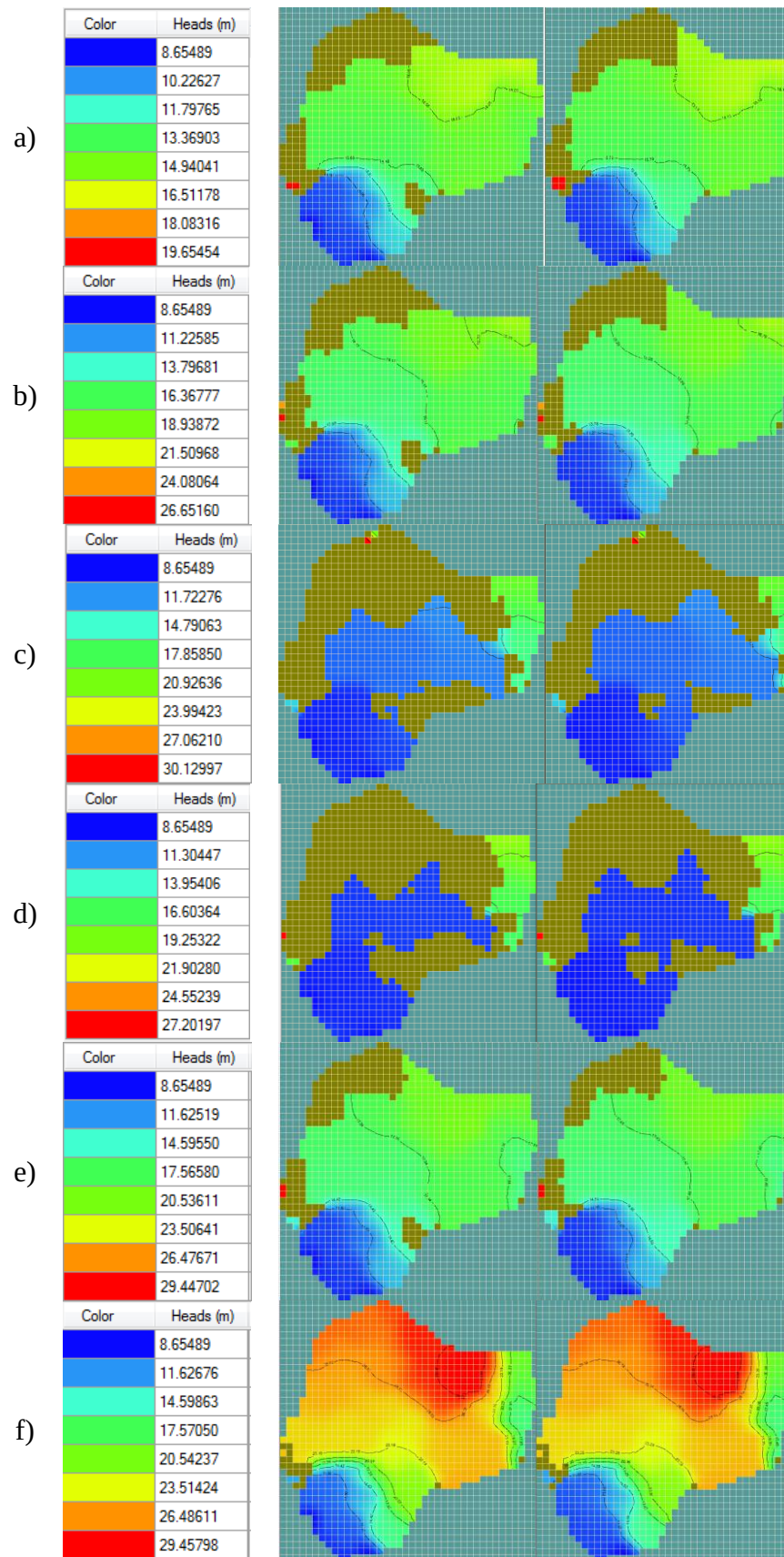
Figur 18. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a) och försök 2 med en ökning i hydraulisk konduktivitet i friktionsjorden med 10 % (b) och 50 % (c) samt en minskning med 10 % (d) och 50 % (e). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger. Försök 2 för 100 % ökning i friktionsjord blev torr och visade inga resultat.

4.2.3 Försök 3

Större skillnader i hydraulisk potential syntes då den hydrauliska konduktiviteten förändrades i båda lagren. Dock följde förändring i utbredningen för en ändring i båda lagren, se figur 19, mönstret för då den hydrauliska konduktiviteten ändrades i friktionsjorden, se figur 18. Detta antydde att friktionsjordens egenskaper dominerar över leran i hur modellresultatet ter sig snarare än i lerlagret, se figur 17. Skillnaden i NRMS var större än för de andra försöken med en största skillnad på 48,9 procentenheter. Korrelationen skiljde sig med ett spann på 17 procentenheter för de olika fallen, se tabell 13.

Tabell 13. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk (NRMS), antal torra observationsobservationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 3 för hydraulisk konduktivitet

Förändring	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	ATO	Kor
Ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
3 10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	3,6	1,5	1,6	0,4	2,1	24,7	3	0,88
* 50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-3,4	-0,9	1,1	0,4	1,6	19,6	4	0,89
100 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-4,1	-1,4	1,5	0,5	2,3	28,8	5	0,80
-10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,7	1,8	1,9	0,5	2,7	23,5	4	0,84
-50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	12,6	6,3	1,2	8,0	8,0	69,3	3	0,72



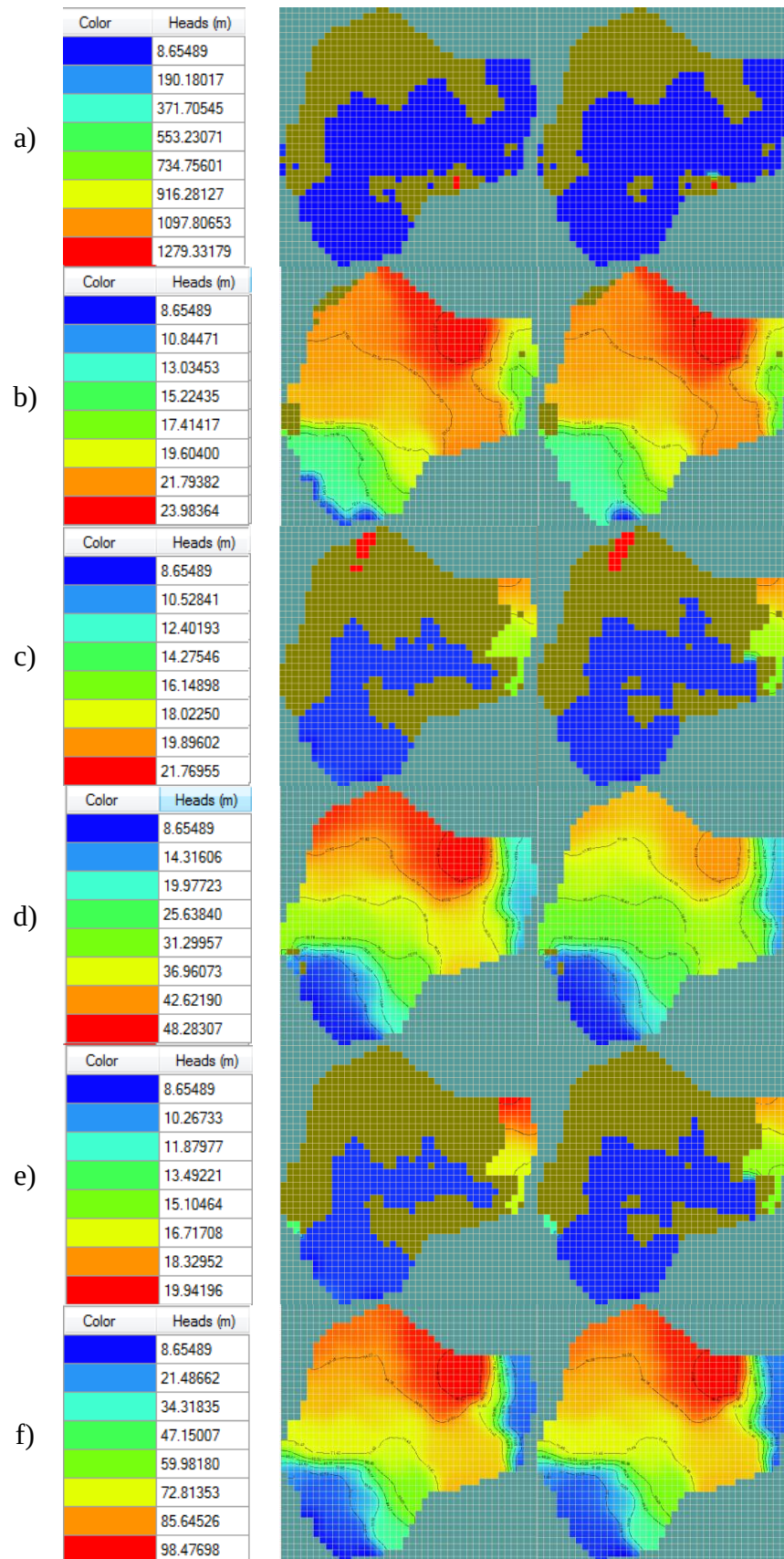
Figur 19. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a) och försök 3 med en ökning i hydraulisk konduktivitet för båda lagren med 10 % (b), 50 % (c) och 100 % (d) samt en minskning med 10 % (e) och 50 % (f). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.2.4 Utökad känslighetsanalys för hydraulisk konduktivitet

Då den hydrauliska konduktiviteten minskades med en tiopotens i lerlagret, friktionsjorden eller för båda svämmade modellen över, se Figur 20. En ändring i friktionslagret betydde mest då den modellen svämmade över betydligt mer än vid ändring i lerlagret. Då den hydrauliska konduktiviteten minskades i båda lagren kunde mycket lite eller inget vatten gå ner i modellen vilket skapade en alltför hög potential, se figur 20. Detta syntes också i NRMS då NRMS för en minskning i båda lagren var 430,5 % jämfört med 159,1 % för friktionsjorden och 49,5 % för lerlagret, se tabell 14. Vid en ökning av den hydrauliska konduktiviteten i leran, friktionsjorden eller båda så blev det istället för lite vatten i modellen, figur 20. Återigen syntes en större skillnad vid en förändring i friktionsjordslagret då leran hade en så pass mycket bättre NRMS, se tabell 14. Fyra till fem observationsrör var torra då den hydrauliska konduktiviteten ökades. Detta tillsammans med att konstant hydraulisk potential 2 bidrog till inflödet tydde på för lite vatten, se figur 20. En så stor skillnad som 410,2 procentenheter erhöles för NRMS och 38 procentenheter för korrelationen.

Tabell 14. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för den utökade osäkerhetsanalysen

	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	ATO	Kor
<i>Ref</i>	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
1 -10	$3,7 \cdot 10^{-07}$	8,6	4,8	4,8	0,7	5,7	49,5	0	0,68
10	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-2,7	-0,7	0,8	0,3	1,2	15,0	4	0,94
2 -10	$3,7 \cdot 10^{-07}$	27,3	14,2	14,2	2,8	18,4	159,1	0	0,66
10	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-4,5	-1,5	1,6	0,6	2,6	31,8	5	0,76
3 -10	$3,7 \cdot 10^{-07}$	75,3	38,8	38,8	7,3	49,7	430,5	0	0,56
10	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-4,6	-1,6	1,7	0,6	2,6	32,4	5	0,76



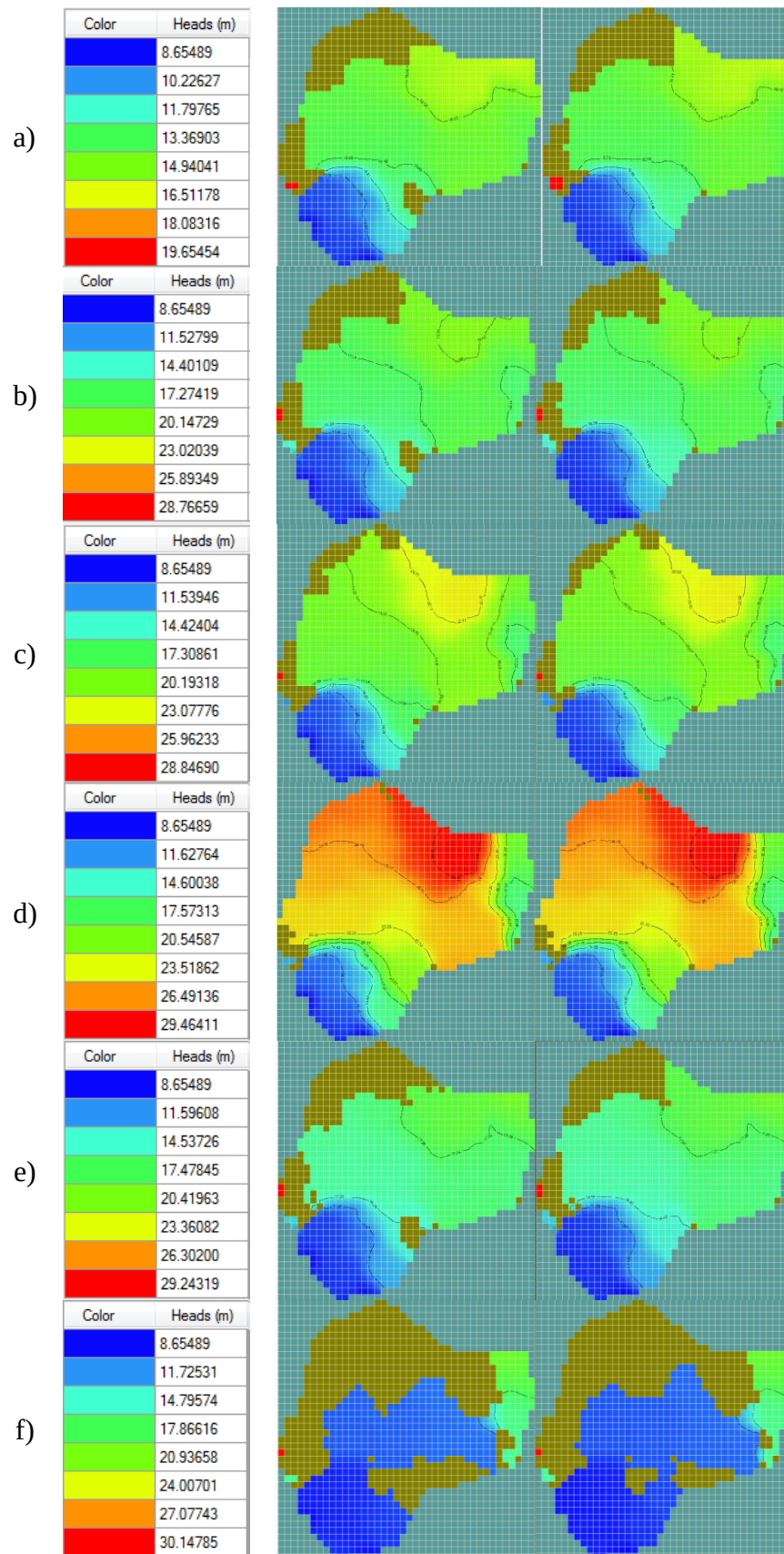
Figur 20. Hydraulisk potentialkarta för en ökning i hydraulisk konduktivitet med en tiopotens för leran (a), friktionsjorden (c) och båda lagren (e) samt en minskning med en tiopotens för leran (b), friktionsjorden (d) och båda lagren (f). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.3 GRUNDVATTENBILDNING

Även om mängden vatten ökade så var ökningen linjär då beräknad då korrelationen inte blev så låg, se tabell 15. Ju mer vatten som tillfördes modellen desto högre blev grundvattenytan, dock inte helt fritt då CH1 och CH2 dränerade till en viss nivå, figur 21. Detsamma gällde för en minskning på 10 % då fortfarande tillräckligt mycket vatten flödade in i modellen. Då grundvattenbildningen minskades med 50 % är inflödet för litet och konstant hydraulisk potential 2 bidrog till inflödet, figur 21. För en minskning på både 10 % och 50 % blev fler observationsrör torra, tre respektive fyra, men ändå var NRMS högre, se tabell 15.

Tabell 15. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för olika grundvattenbildning

Förändring i grundvattenbildning	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	ATO	Kor
10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,6	1,8	1,9	0,5	2,67	23,17	1	0,84
50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	7,3	3,1	3,1	0,7	4,19	36,28	0	0,79
100 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	12,6	6,3	6,3	1,2	7,99	69,25	0	0,72
-10 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	3,8	1,8	1,6	0,4	2,09	24,33	3	0,88
-50 %	$3,7 \cdot 10^{-07}$	-3,8	-1,1	1,2	0,4	1,84	22,90	4	0,86



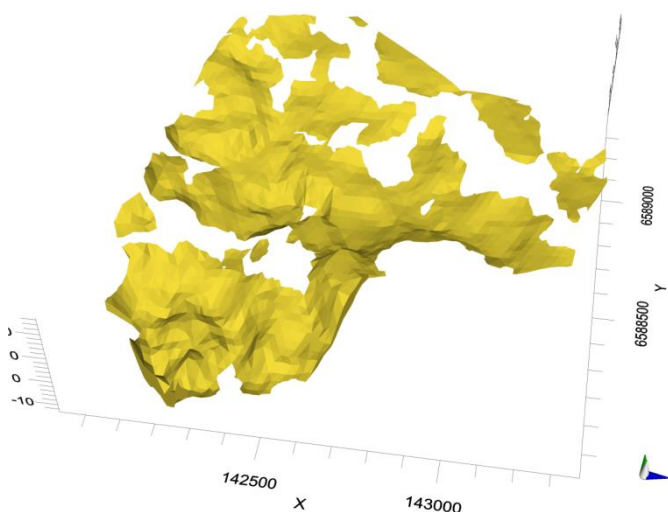
Figur 21. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a) och en ökad grundvattenbildning med 10 % (b), 50 % (c) och 100 % (d) samt en minskad grundvattenbildning med 10 % (e) och 50 % (f). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.4 DATAMÄNGD

Då datas upplösning i tid och rum ändrades upptäcktes tydliga trender i att ju mindre sammankopplad friktionsjordszonen var desto mindre rörlighet hade vattnet, se avsnitt 4.4.1, 4.4.2 och 4.4.3. Detta gav upphov till fler torra observationsrör och ofta en mindre utbredning för grundvattenytan. Detta fenomen blev tydligare då försök 7, med en platt bergsyta och helt sammanhängande friktionsjordszon, hade färre torra observationsrör och en mer utbredd grundvattenyta, se avsnitt 4.4.4.

4.4.1 Försök 4 - MMS

Friktionsjordszonen för MMS var mindre sammanhängande än för referensfallet. Övre delen var helt bortkopplad från resten av zonen, se figur 22.

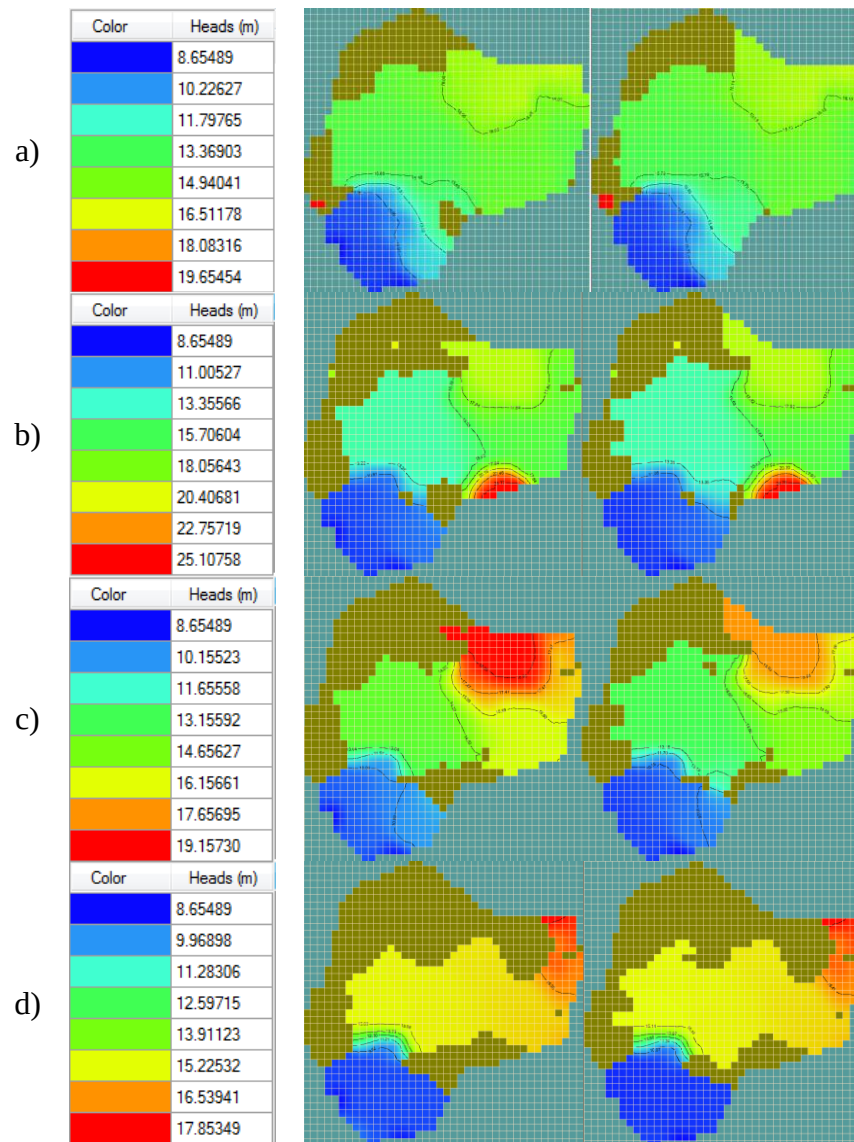


Figur 22. Friktionsjordszonen för markmodell tillsammans med sonderingar.

För dataset 1 som bestod av data från markmodellen tillsammans med resultat av sonderingarna och grundvattenbildning som i referensfallet syntes en tydlig förbättring i NRMS jämfört med referensfallet, se tabell 16. Även om det observerade värdet och det kalkylerade värdet korrelerade, så var utbredningen av grundvattenytan inte tillräcklig, se figur 23. Att utbredningen inte var tillräckligt stor ledde till att fyra observationsrör blev torra. Torra observationsrör gav som tidigare ett bättre NRMS då inte alla observationsrören var med i uträkningen. En uppdämning sker i zon 10 vid applicering av grundvattenbildning som i referensfallet medan flödet var mer likt referensfallet vid förändrad placering av grundvattenbildning, se figur 23. Detta gav även ett bättre NRMS än då grundvattenbildningen applicerades enligt referensmodellen dock var fyra observationsrör fortfarande torra, se tabell 16. Vid borttagning av ett osäkert grundvattenbildningsområde erhöles ett ytterligare lite bättre NRMS än de tidigare fallen, se tabell 16, men återigen var fyra observationsrör torra. Tydligt var att modellen fick för lite tillförsel av vatten i detta fall då konstant hydraulisk potential 2 bidrog till inflödet och NRMS var därför missvisande, se figur 23. NRMS var 6 procentenheter bättre för det bästa fallet för försök 4 än för referensfallet och 11 procentenheter bättre för korrelationen. Dock var många fler observationsrör torra.

Tabell 16. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för de försök 4. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning

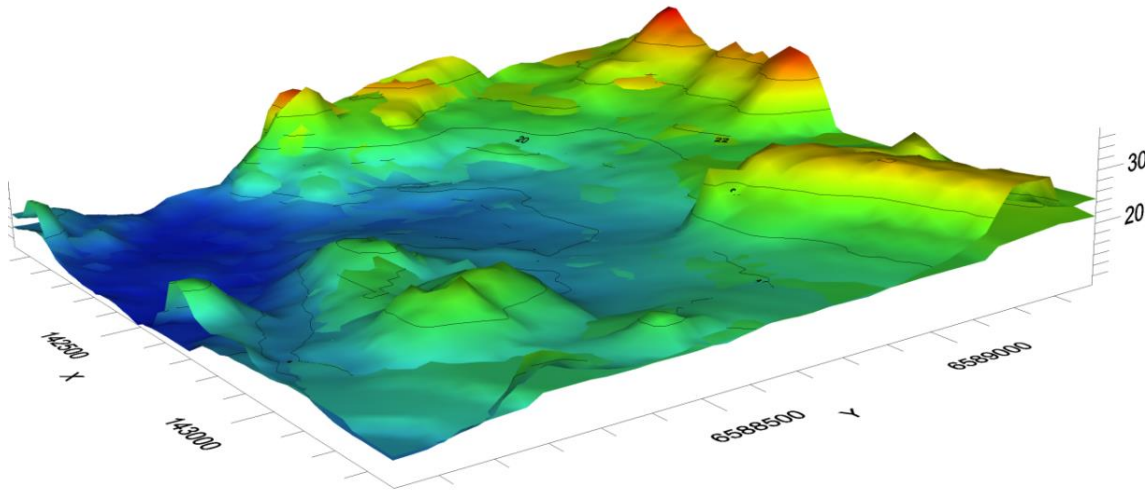
Försök	R	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	AT O	Kor
Ref	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
4	ref	-0,03	2,5	1,2	1,1	0,3	1,1	17,6	4	0,95
	RC1	-0,03	2,1	0,9	1,0	0,2	1,3	15,6	4	0,96
	RC2	-0,03	2,6	0,7	0,8	0,3	1,2	14,4	4	0,96



Figur 23. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a) och MMS. Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger. Då grundvattenbildning applicerades på samma ställe som i referensmodellen syns en uppdämning i zon 10 (b). Det bidragande flödet ändras då grundvattenbildningens appliceringsområden flyttas (c) och tydligt är att övre delen bidrar mest till inflödet då detta tas bort (d).

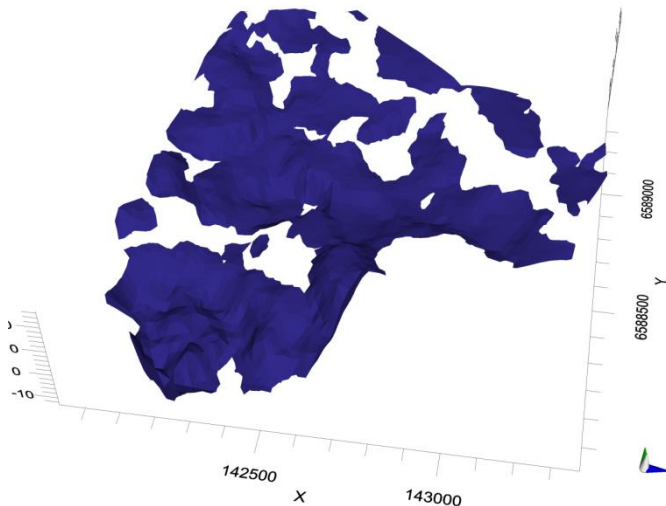
4.4.2 Försök 5 - SMS

Modellytan med lägre datatäthet skiljde sig från ytan som skapats utifrån markmodellen, se figur 24. Marksonderingarna var färre än antalet informationspunkter för markmodellen och missade höjdpunkter i området vilket gjorde att ytan blev flackare än för den laserskannade modellen.



Figur 24. Skillnaden mellan den yta som skapas av markmodellen (övre) och den yta som skapas av sonderingar för markytan (nedre) är att sonderingarna inte får med höjdpunkter i området. Förutom i de högsta punkterna är ytorna mycket lika.

Friktionsjordszonen för SMS var likadan som för MMS, se figur 25, vilket inte var förvånande då detta lager inte bestäms av marknivån vilket var enda skillnaden.

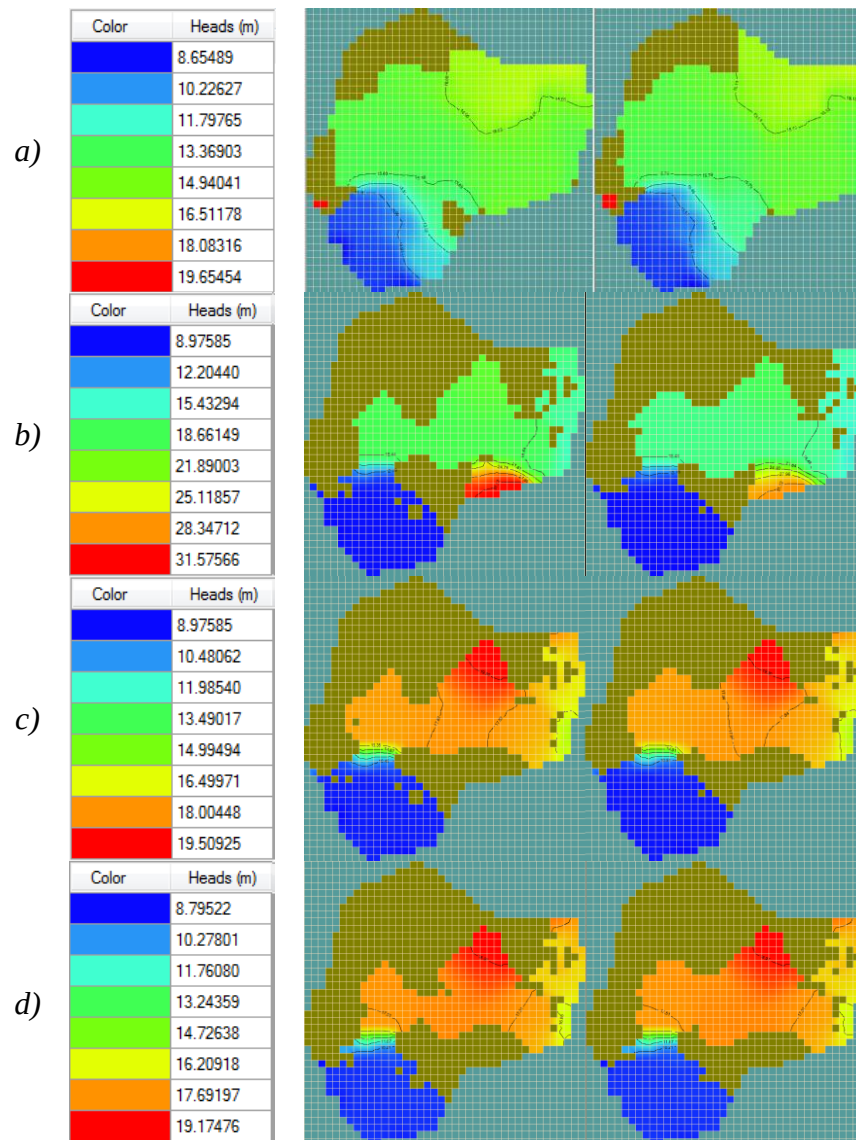


Figur 25. Friktionsjordszon för SMS är mycket lik friktionsjordszonen för MMS.

Fastän det kunde tyckas att modellen innehöll för mycket vatten vid jämförelse av observerat och beräknat värde för grundvattennivån i de observationsrör som har vatten i sig syns tydligt att utbredningen var mycket mindre jämfört med referensfallet, se figur 26. Det var även tydligt att konstant hydraulisk potential 2 bidrog till inflödet, se figur 26. Trots att lika många observationsrör var torra som för MMS har SMS ett mycket högre NRMS, se tabell 17. Det var en skillnad på 13 procentenheter i NRMS för det bästa fallet för försök 5 jämfört med referensfallet och 2 procentenheter för korrelationen. Där det bästa fallet för försök fem fortfarande var sämre än referensfallet.

Tabell 17. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 5. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning

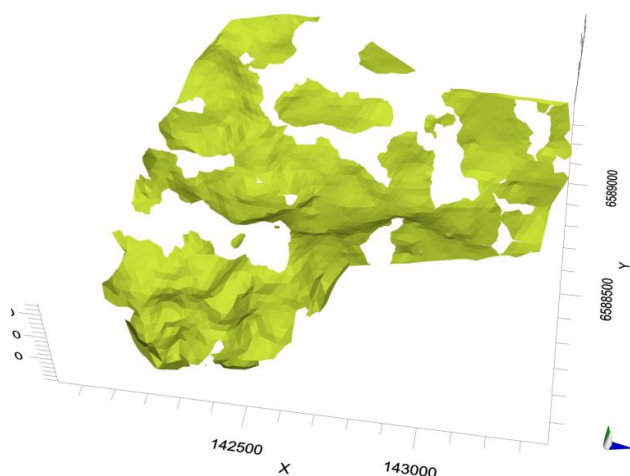
Försök	R	Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	ATO	Kor
Ref	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
5	ref	-0,03	6,0	2,1	2,2	0,7	3,3	41,5	4	0,83
	RC1	-0,03	5,1	1,7	1,8	0,6	2,8	34,7	4	0,86
	RC2	-0,03	4,9	1,6	1,8	0,6	2,7	33,4	4	0,87



Figur 26. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a), SMS med en grundvattenbildning enligt referensfallet (b), SMS med förändrad plats för applicering av grundvattenbildning (c) samt SMS med förändrats plats och ett borttaget område för grundvattenbildning (d). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.4.3 Försök 6 - MMSh

Friktionsjordszonens form för MMSh var mycket mer sammanhängande än friktionsjordszonen för MMS och SMS, se figur 27. Då zonen var mer sammankopplad ökade vattnets mobilitet.

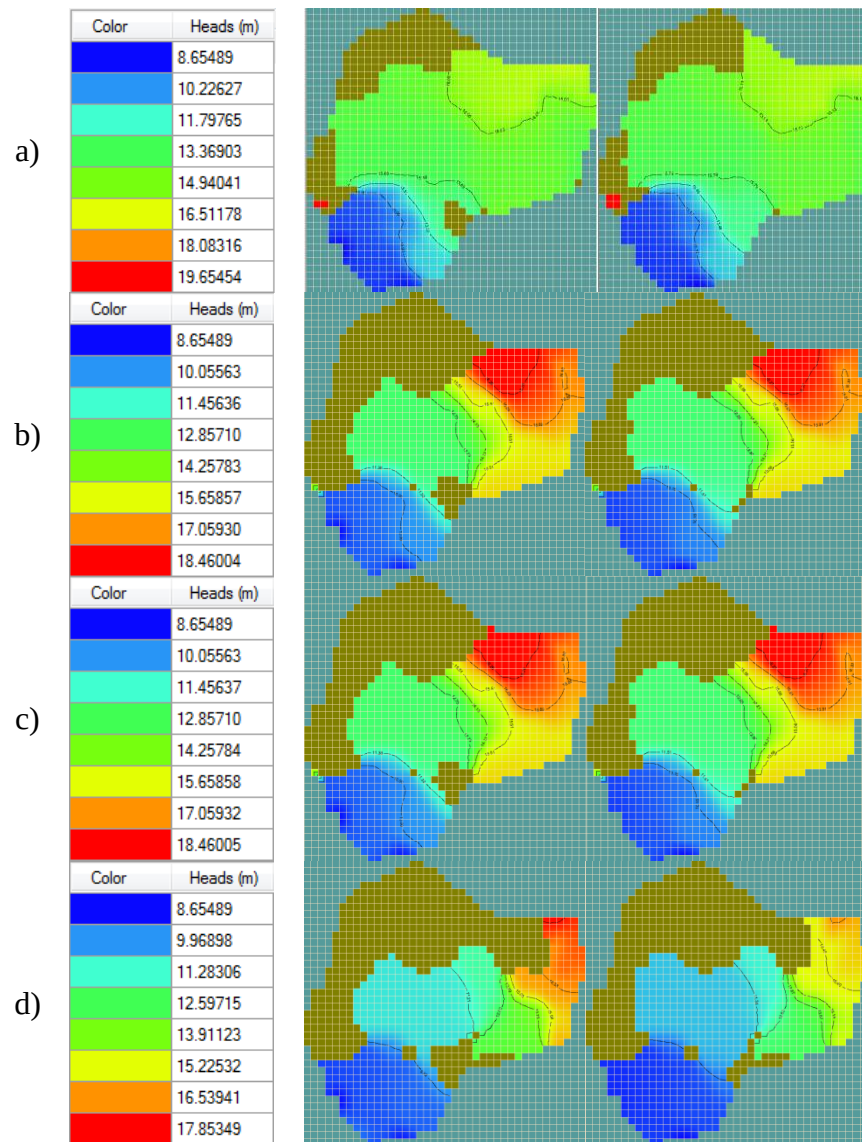


Figur 27. Friktionsjordszonen för MMSh.

Detta försök hade ett mycket bra NRMS på 8,5 % då grundvattenbildningen applicerades som i referensfallet, se tabell 18. De tre olika fallen på denna variant hade alla fyra torra observationsrör, se tabell 18, precis som MMS och SMS men att NRMS var så pass mycket bättre kan förklaras med att friktionsjorden var så pass mycket mer sammanhängande. Att friktionsjorden var sammanhängande märks också då man lägger till ett grundvattenbildningsområde och ingen skillnad syntes i resultat, se tabell 18. Om det största området för grundvattenbildningen, också det som ligger högst i modellen, togs bort syntes en tydlig minskning i mängden vatten i modellen. Framförallt syns en skillnad i de övre delarna av modellen, se figur 28. En kraftig förbättring i NRMS mot referensfallet på 11,8 procentenheter för bästa fallet och 13 procentenheter i korrelation.

Tabell 18. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 6. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning

Försök		Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs mean [m]	SEE [m]	RM S [m]	NRM S [%]	ATO	Kor
Ref 6	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
	ref	-0,03	1,9	0,4	0,5	0,1	0,7	8,5	4	0,98
	RC1	-0,03	1,9	0,4	0,5	0,1	0,7	8,5	4	0,98
	RC2	-0,03	-2,4	-0,7	0,8	0,3	1,2	14,7	4	0,94

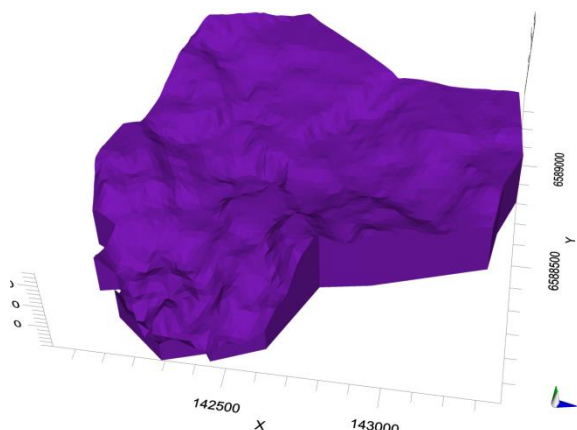


Figur 28. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a), MMSh då grundvattenbildning appliceras på samma områden som i referensfallet (b), MMSh med ett extra grundvattenbildningsområde (c) och med endast två grundvattenbildningsområden (d). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.4.4 Försök 7 - BP

Då en platt bergsyta användes som avgränsning för berg blev friktionsjordszonen mäktigare och fullständigt sammanhängande, se figur 29. Även om mycket vatten

befinner sig i modellen så kan allt vatten röra sig med lätthet över hela zonen vilket syntes på grundvattenytans utbredning, figur 30.

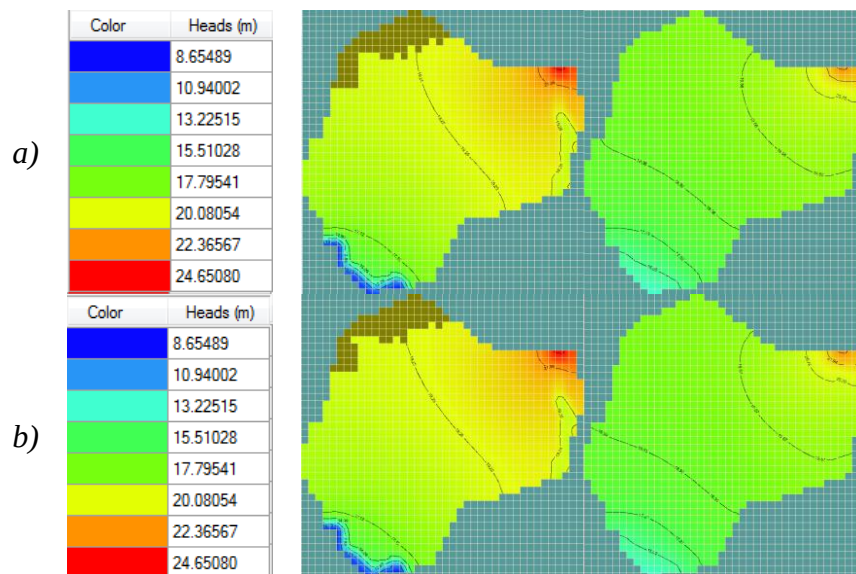


Figur 29. Zon 2 för modellen med en platt bergsyta.

Flödeslinjerna och utbredningen av grundvattenytan visade tydligt att vatten kunde röra sig lättare i denna modell, se figur 30, och även att inga observationsrör var torra. Modellen var också robust då ingen större skillnad kunde ses fastän ytterligare fyra grundvattenbildningsområden lades till, se tabell 19. Antal torra observationsrör var fler än för referensfallet och både NRMS och korrelationen var kraftigt försämrade med 23,7 procentenheter respektive 16 procentenheter sämre för det bästa fallet för försök 7.

Tabell 19. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 7. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning

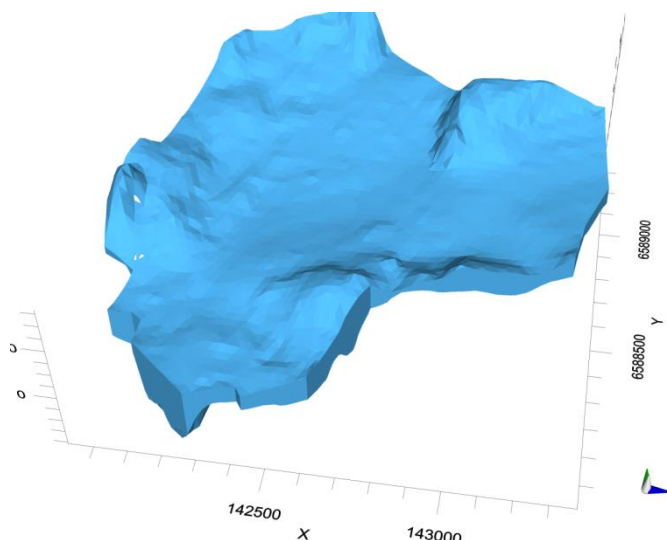
Försök		Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SE E [m]	RM S [m]	NRM S [%]	AT O	Kor
Ref	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
7	ref	0,3	8,1	4,2	4,3	0,7	5,1	44,1	0	0,59
	RC	0,7	8,2	4,2	4,3	0,7	5,1	44,3	0	0,59



Figur 30. Hydraulisk potentialkarta för platt bergsyta med en grundvattenbildning som för referensfallet (a) och platt bergsyta med grundvattenbildning på alla områden med friktionsjord i dagen (b). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger. Referensfallet är inte representerat här.

4.4.5 Försök 8 - Medel

För modellen med ett medelvärde av friktionsjordens och lerans hydrauliska konduktivitet för endast en zon i djupled var lagret återigen mäktigare och sammanhängande vilket också ledde till bättre framkomlighet för vattnet, se figur 31.

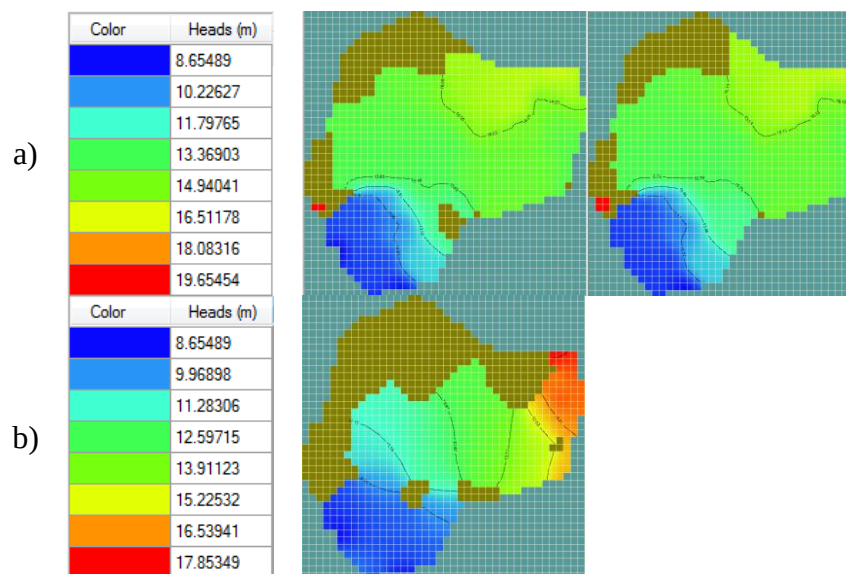


Figur 31. Endast en zon existerade för medelvärdesfallet.

Denna modell hade absolut bäst NRMS av alla med ett NRMS på 6,2 %, se tabell 20. Även om antalet torra observationsrör var fyra som för de flesta andra modellerna erhöles en korrelation på 99 %. Den tidigare nämnda flaskhalsen fanns inte i detta försök vilket gjorde att den hydrauliska potentialen inte stiger i mitten observationsrören. Tydligt var dock att modellen krävde mer vatten då konstant CH2 återigen bidrog till inflödet och utbredningen var liten, se figur 32.

Tabell 20. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsobservationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 8. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning

Försök		Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRM S [%]	ATO	Kor
Ref	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
8	ref	0,003	-1,3	-0,2	0,3	0,1	0,5	6,2	4	0,99



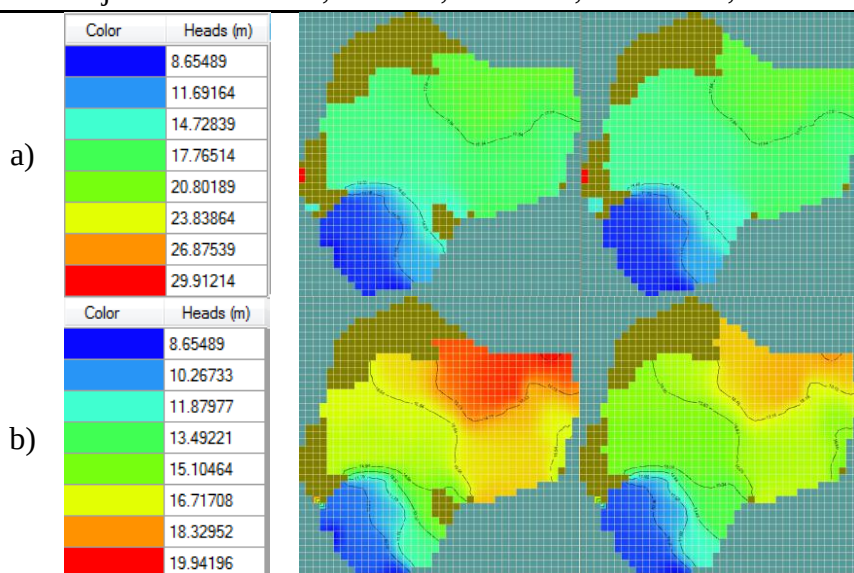
Figur 32. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a) och ett lager med ett medelvärde på hydraulisk konduktivitet (b). Lager 1 ligger till vänster och lager 2 till höger för referensfallet och endast ett lager för medelvärdeslagret.

4.4.6 Försök 9 - Mängden observationsobservationsrör

Vid första anblick kunde det tyckas att den hydrauliska potentialen skiljer sig då mängden observationsobservationsrör ändrades, men så var inte fallet. Olika utstickande områden uppstod vilket påverkade skalan för den hydrauliska potentialen och därför färgsättningen men grundvattenytan var lika för alla tre fallen, se figur 33. NRMS var något bättre då halva mängden användes men vid jämförelse så låg värdet på observerad och uträknad hydraulisk potential för samma observationsrör fortfarande på samma ställe vilket innebar att skillnaden uppstod beroende på vilka observationsrör som användes vid beräkning. Som tidigare nämnts användes inte torra observationsrör i beräkning av residualer och NRMS med mera och beroende på vilka observationsrör som inkluderades ändrades alltså resultatet, se tabell 21. Då vissa av de observationsrör som ligger i mitten som alltid hade för hög hydraulisk potential togs bort förbättrades såklart resultatet. NRMS var 2,3 procentenheter bättre för det bästa fallet för försök 9 än för referensfallet och korrelationen 2 procentenheter bättre, se tabell 21.

Tabell 21. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsobservationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för försök 9. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning

Försök		Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SEE [m]	RMS [m]	NRMS [%]	ATO	Kor
Ref	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
9	halva	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,0	1,4	0,6	2,1	18,1	1	0,87
	fjärdedel	0,05	3,4	0,9	1,0	0,7	1,6	20,6	1	0,93



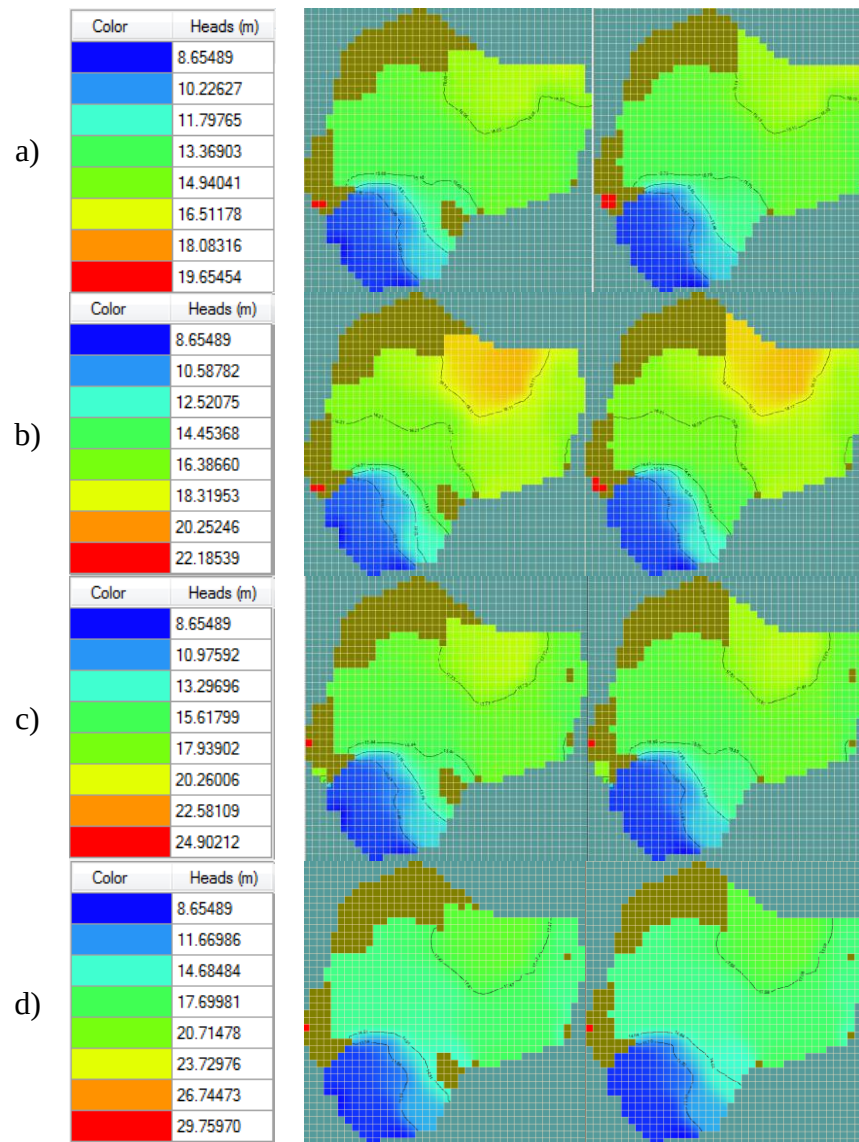
Figur 33. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet med halva mängden observationsobservationsrör (a) och en fjärdedel av mängden observationsobservationsrör (b). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.4.7 Försök 10 - Validering

Det valideringsset som låg närmast i tiden för referensfallet som var från den 9 mars 2015 var valideringsset 1 från den 23 februari 2015. Dessa två set var mycket lika, se tabell 22. De skiljde sig dock från de två senare valideringsseten som hade för mycket vatten, se figur 34. Att de två senare tillfällena var torrare perioder styrktes av flera torra celler omkring CH2, figur 34, och antal torra observationsrör, se tabell 22. Valideringsset 1 hade en förbättring i NRMS på 1,19 procentenheter medan valideringsset 2 och 3 hade en försämring på 14,2 respektive 12,8 procentenheter.

Tabell 22. Minsta residual (Min res), maximal residual (Max res), medelresidual (Mean res), absolutmedelvärdesresidual (Abs mean res), standardavvikelse för skattningen (SEE), kvadratisk medelvärde (RMS), normaliserat kvadratisk medelvärde (NRMS), antal torra observationsrör inom modellområdet (ATO) och korrelation (kor) för valideringen. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och 1,2 och 3 står för de olika valideringsseten

Försök		Min res [m]	Max res [m]	Mean res [m]	Abs res mean [m]	SE E [m]	RM S [m]	NRMS [%]	AT O	Kor
Ref	ref	$3,7 \cdot 10^{-07}$	4,1	1,5	1,7	0,5	2,4	20,4	1	0,85
10	1	-0,03	3,9	1,3	1,7	0,5	2,2	19,2	1	0,86
	2	-0,02	4,4	2,3	2,3	0,5	2,9	34,6	3	0,74
	3	-0,02	4,3	2,2	2,2	0,5	2,8	33,1	3	0,77

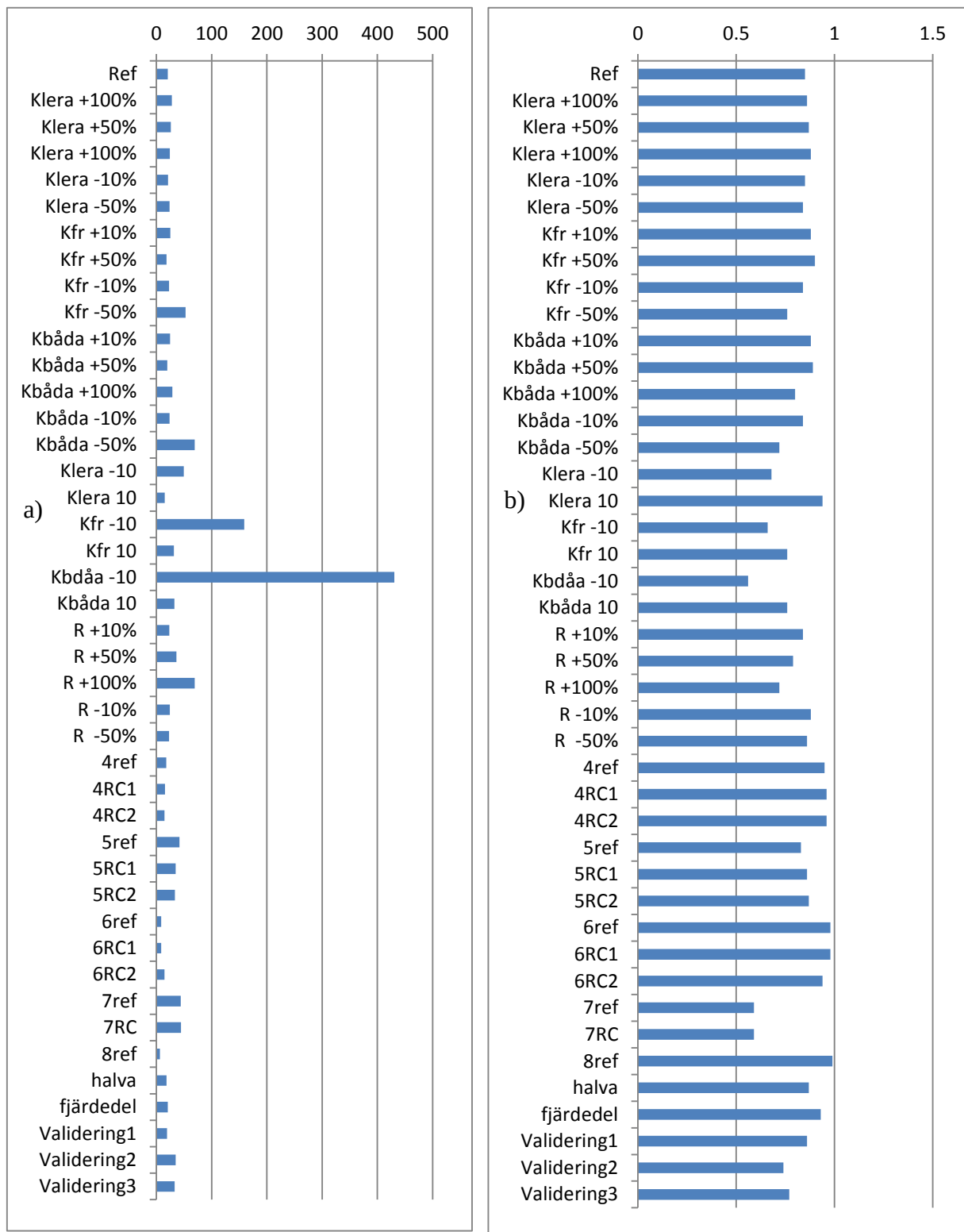


Figur 34. Hydraulisk potentialkarta för referensfallet (a), valideringsset 1 (b), valideringsset 2 (c) och valideringsset 3 (d). Lager 1 ligger till vänster i varje delbild och lager 2 till höger.

4.5 ALLA FÖRSÖKEN

Bäst NRMS återfås vid en ökning av antingen friktionsjorden eller både friktionsjord och lera samtidigt med 50 %, se tabell 12 och tabell 13. Dock är det tydligt att modellen har ett för litet inflöde av vatten då 4 observationsrör är torra och konstant hydraulisk potential 2 agerar inflöde, se figur 18 och figur 19. De tre observationsrören 14BE72, 14BE075 och 14BE098 ska vara inaktiva då de befinner sig i det inaktiva området medan alla andra observationsrör som är inaktiva är torra observationsrör inom modellområdet. Försök 2 för 100 % ökning i friktionsjord blev torr och visade inga resultat. De fall som kommer närmast verkligheten med minst antal torra observationsrör var då den hydrauliska konduktiviteten minskades med 10 % och 50 % för alla tre försöken, se tabell 11, tabell 12 och tabell 13. Dessa har dock ett högt NRMS då de innehåller för mycket vatten till följd av för låg hydraulisk konduktivitet. De är också sämre korrelerade för höga och låga värden än referensfallet. Även om de innehåller för mycket vatten så följer de grafen väl vilket innebär att om grundvattenbildningen minskades skulle bättre resultat kunna uppnås. För försöken där den hydrauliska konduktiviteten ökades, utöver försök 2 och 3 för 50 % ökning, blev fler observationsrör inaktiva vilket gav ett lägre NRMS än för de försök där alla observationsrör räknades med, se tabell 11, tabell 12 och tabell 13. De innehåller dock fortfarande för mycket vatten men då vatten flödar lättare är utbredningen inte lika stor vilket ger upphov till det större antalet torra observationsrör, figur 17, figur 18 och figur 19.

Den utökade känslighetsanalysen gav absolut störst förändringar i resultatet för den hydrauliska potentialen, se figur 35. En tydlig förbättring syntes för MMS och MMS_h medan SMS hade en försämring i resultat. Försök 7 och 8 visade en försämring respektive en tydlig förbättring vilket tyder på att bergytan är viktig. För 7 var NRMS bättre men korrelationen kraftigt sämre medan för 8 var fallet tvärtom. Det syntes tydligt i den utökade känslighetsanalysen att en förändring i den hydrauliska konduktiviteten i båda lagren gav en kraftig försämring i resultat. Därefter kom en förändring i friktionsjorden och sist lera. Samma mönster kunde ses i den första känslighetsanalysen för hydraulisk konduktivitet. Att var grundvattenbildningen ansattes spelade roll syntes tydlig i de väldigt skilda resultaten som uppnås för då appliceringsområden ändrades för försök 4,5,6,7 och 8. Även om dessa skillnader var mindre än då grundvattenbildningens storlek förändrades så gav det upphov till fler oväntade olikheter.



Figur 35. NRMS (a) och korrelation (b) för de olika dataseten. Ref står för ursprunglig grundvattenbildning och RC för Recharge changed, vilket alltså är ändrad grundvattenbildning. De procentuella förändringarna utgår ifrån referensfallets parametervärden. Klera är en förändring i K i lera, Kfr en förändring i K i friktionsjorden och Kbåda då en förändring skedde i K i båda lagren samtidigt. 4-8 är de respektive försöken.

5. DISKUSSION

Den hydrauliska konduktiviteten och grundvattenbildningen ändrades i procentuellt lika stora steg för att kunna jämföras, se tabell 5 och tabell 7. Jämförelsen visade att en ökning i grundvattenbildning gav sämre resultat än en liknande ökning i hydraulisk konduktivitet (med avseende på NRMS och korrelation), se tabell 11, tabell 12, tabell 13, tabell 15 och figur 35. Att en ökning i grundvattenbildningen visade sämre resultat är till följd av ett för högt inflöde då grundvattenbildningen ökar vilket ger för mycket vatten i modellen. Detsamma gäller då den hydrauliska konduktiviteten minskas vilket också bidrar till ett högt NRMS och lägre korrelation. Skillnaden är dock markant större för ökning av grundvattenbildningen då den minskade genomsläppligheten fortfarande är relativt lik ursprunglig hydraulisk konduktivitet. Då grundvattenbildningen minskas uppnås en liknande NRMS och korrelation som för ökad hydraulisk konduktivitet, dock är detta svårbedömt då CH2 bidrar till inflödet och påverkar vattenbalansen då grundvattenbildningen minskas, se figur 21. Detta gör att modellen inte blir torr fastän grundvattenbildningen egentligen inte räcker till. En för låg grundvattenbildning kan därför inte uppnås med de randvillkor som använts.

Pumptester är viktiga medel vid grundvattenmodellering då de ger information om det vattenförande lagrets genomsläpplighet. Johnson (2007) ansåg att den näst känsligaste parametern var hydraulisk konduktivitet i båda lagren, näst efter det högst belägna grundvattenbildningsområdet. Vid utvärdering av de resultat som erhållits under denna studie anses friktionsjordens hydrauliska konduktivitet vara både känsligast och viktigast av de två lagren, se figur 35. Dock återfås allra störst skillnad vid en förändring i de båda lagren samtidigt och därmed kan Johnsons slutsats antas applicerbar även här. Då den hydrauliska konduktiviteten har mycket hög osäkerhet vid mätning är den utökade känslighetsanalysen mer representativ för den information som ofta finns tillgänglig i verkligheten. NRMS för då den hydrauliska konduktiviteten sänks med en tiopotens i de båda lagren blir så hög som 430, se tabell 14. Det viktigaste lagret att utvärdera är friktionsjordslagret då en ökning med en tiopotens ger ett NRMS på 31,8 och en minskning på en tiopotens ger ett NRMS på 159,1. Oavsett förändring blir NRMS sämre. Detta beror på att det är i detta lager vattnet rör sig och genomsläppligheten i detta lager påverkar därför resultatet kraftigt. Om lerlagrets hydrauliska konduktivitet ökas med en tiopotens kan vattnet börja röra sig även i detta lager då skillnaden mellan de två lagren minskar, vilket ger en NRMS på 15. Det vattenförande lagret kan dock anses viktigast generellt.

Även om grundvattenbildningens storlek är viktig så är applicering av den ännu viktigare. Johnson (2007) hävdade att det högst belägna grundvattenbildningsområdet är den känsligaste parametern. Detta styrks av att då det största och högst belägna grundvattenbildningsområdet för MMS och MMSh tas bort kan modellen inte längre fylla den övre delen av modellen, se figur 23 och figur 28. Behålls detta som för SMS så sker ingen större skillnad i vattenmängd i modellen fastän andra lägre liggande områden tas bort, se figur 26. Johnson anser att högst belägna grundvattenrör bidrar med viktigast information. För modellen är det också viktigt att undersöka vilka områden med

friktionsjord i övre lagret som är ihopkopplade med friktionsjorden i det undre lagret. Detta då modellen inte kan hantera ytavrinning och därför svämmas över i de punkter där grundvattenbildning appliceras utan koppling till det vattenförande lagret.

Den största skillnaden mellan SMS och MMS är att sonderingarna missar höjdpunkterna, se figur 24. Marklund (2009) säger att grundvattenytan inte följer topparna i geografin utan bara allmänt formen så att en lågupplöst yta borde representera grundvattenytan bättre. Med avseende på detta bör representationen för grundvattenytan var relativt lika för de två fallen, men så är inte fallet. Trots att friktionsjordslagren ser likadana ut så ser SMS ut att innehålla mindre vatten än MMS, se figur 23 och figur 26.

Då en så pass stor skillnad i NRMS uppnås beroende på vilka observationsrör som används vid beräkning kan det antas att många men också utspridda observationsrör är att föredra, se tabell 22. För de flesta av fallen där sju observationsrör är inaktiva är det de översta i nordvästra delen av modellen som blir torra. Då dessa inte används i beräkningen blir NRMS bättre men modellen följer inte längre den verkliga grundvattenytan. De observationsrör som befinner sig i mitten av modellen, alltså 14BE136, 14BE137, 14BE111 och 14BE063 är de observationsrör som alltid har för mycket eller för lite vatten. Om dessa skulle elimineras skulle ett bättre NRMS uppstå vilket kan ses då endast en fjärdedel av observationsrören användes vid beräkning som gav en korrelation på 93 %, se tabell 21. Alltså att höga värden är förknippade med höga värden och låga med låga. För att se till att inte missa avvikande resultat mellan modell och verkligheten, som för de observationsrören i mitten av modellen som 14BE063, och avgöra om en modell är riktig krävs därför jämnt fördelade och utspridda observationsrör.

Detsamma gäller placering av sonderingspunkter. Modellområdet valdes då det innehöll data som täckte hela området. Detta för att då ytorna skapades utifrån de sonderingspunkter som fanns för ett större område så ansågs inte ytorna representativa för verkligheten. Anledningen till detta var att de sonderingspunkter som fanns var kraftigt centrerade runt området för tunnelbanesträckningen vilket gav mycket information till modellen kring denna smala sträckning men ingen information fanns för området utanför vilket gjorde att de yttersta sonderingspunkterna sträcktes ut till modellområdets rand. Därför är mer utspridda sonderingspunkter också att föredra om hela grundvattenytan är intressant, som i detta fall.

Sonderingar är dock mycket viktiga. Framförallt är informationen om bergsnivån av intresse då det är denna nivå som ofta ger formen för flaskhalsar. Vid jämförelse av försök 4,5 och 6 som alla har flaskhalsen i det sydöstra hörnet märks att vattnets framkomlighet hindras då den hydrauliska potentialen är högre i de centrala delarna av området, vid inloppet till flaskhalsen, se figur 23, figur 26 och figur 28. För försök 7 med en plattytta och därmed en sammanhängande friktionsjordzon som dessutom är tjockare än de andra tre uppnås ett högre NRMS och mer utbredd grundvattenyta till följd av att inga hinder finns i friktionsjordszonen, se tabell 19 och figur 30. Detta leder också till att observationsrör som inte ska ha så hög hydraulisk potential får högre potential då mer vatten flödar till dem. För försök 8 med en zon som fortfarande följer bergets form men

där flaskhalsen i friktionsjordszonen försvinner är NRMS det bästa för alla försök på 6,2 %, se tabell 20. Dessutom är detta det enda försöket där observationsrören i mitten inte har för hög hydraulisk potential, se figur 32. Ett lägre NRMS och att den beräknade grundvattenytan följer den observerade då vatten får röra sig fritt tyder på att flaskhalsen utgör den bestämmande formen för grundvattenytan och därför ytterst viktig att få med i modellen.

Visual MODFLOW flex gick snabbt att använda och det var enkelt att införa data. För geologisk data krävdes en kolumn för x-koordinaten, en för y-koordinaten och en för höjddata. Observationsrören krävde mer information men inte oöverkomligt. Det gick att införa från både Excelformat och från GIS-filer vilket underlättade vid införande från kartor som skapats i Arcmap för området, såsom floden. Det viktiga vid användande av Excel är att tänka på att Visual MODFLOW flex läser allt kolumnvis och därför behöver information ligga i en och samma kolumn för en variabel. Beroende på vad som är intressant att modellera krävs olika mycket information för hur området ska byggas upp. Om endast ett litet område är av intresse är det mycket möjligt att utspridda sonderingspunkter inte är av intresse utan en korrekt yta endast behövs för intresseområdet.

Utifrån tidigare resonemang anses följande lista ange vilken parameter som är viktigast, där 1 är viktigast.

1. Mätningar av geologiska nivåer (Sonderingar)
2. K i friktionsjorden (Pumptester)
3. Applicering av grundvattenbildning
4. Grundvattenbildningens storlek
5. K i lera
6. Mängden och placering av observationsrör
7. Placering av sonderingar

Sonderingar är viktigast då utan dessa finns ingen information om bergets form. I detta fall är det tydligt att berget styr grundvattenflödet då försök 7 med platt bergsyta får mycket högt NRMS och låg korrelation medan försök 8 med en zon som följer bergytan får så pass lågt NRMS och hög korrelation, se tabell 19, tabell 20 och figur 35. I vilken ordning den hydrauliska konduktiviteten spelar roll syns tydlig i försök 1, 2, 3 och den utökade känslighetsanalysen, se tabell 11, tabell 12, tabell 13 och tabell 14. Att applicering och storlek av grundvattenbildning kommer före hydraulisk konduktivitet i lera beror på dess kraftiga variation i resultat respektive högre NRMS än för hydraulisk konduktivitet i lera. Mängden observationsrör påverkar resultatet för NRMS beroende på var de är placerade. Denna parameter kan också skilja sig kraftigt beroende på vad för typ av akvifer det är och hur området i allmänhet ser ut. En tjock och platt friktionsjordszon med god framkomlighet och bra grundvattenbildning behöver ha färre rör för att få med variationer i grundvattenytan. Detsamma gäller för placering av sonderingar. Beroende på vad man vill visa och hur terrängen ser ut krävs olika mycket

sonderingar och parameter sju och åtta i listan är därför mer beroende på modell och område än ett till sex.

5.1 OSÄKERHETER

I den sammanställda tabellen för hydraulisk konduktivitet utifrån andras arbete användes en mycket osäker avläsningsmetod vid analys av Heaths (1983) tabell. Den var skapad för att visuellt kunna se intervallet snarare än ett tabellvärde. Det innefattar därför en hög osäkerhet. Då Heaths intervall ändå låg inom det slutgiltiga intervallet inkluderades det ändå. Morris och Johnson (1967) skapade sin tabell utifrån labbförsök och dessa värden antogs därför trovärdiga. Dessa värden var lägre än övriga och utgör därför i de flesta fall den nedre gränsen för den hydrauliska konduktiviteten. Den sammanställda tabellen har skapats utifrån de huvudgrupper som finns och är därför inte speciellt detaljerad. Fanns underklasser fördes dessa samman för att motsvara huvudklassen. Då data för jordlager inte specificeras mer detaljerat än huvudgrupper ansågs en hopslagning av undergrupper som lämpligast. För de hydrauliska konduktiviteter där medelvärdet är skapat utifrån uppmätta hydrauliska konduktiviteter under upprepade försök på olika jordar anses värdet mer korrekt än för de jordtyper där ett medelvärde skapats utifrån intervallets gränser. Samma metod användes vid framtagandet av ett medelvärde för områdets hydrauliska konduktivitet i lera och friktionsjord. Antagandet att dessa två lager är homogena påverkar den modellerade grundvattenytan men då de olika mätpunkterna var mycket lika och PEST inte visade stora skillnader mellan områdena ansågs en homogen jord representera området väl nog.

Då lernivåer från utförda sonderingar är den enda informationen att tillgå för uppdelning av lera och friktionsjord finns en viss osäkerhet i modellens uppbyggnad. Även om markmodellen som är uppmätt med flygplan kan anses tillförlitlig är lernivåns utformning och bergmodellen osäker. Lernivåerna utgår från få punkter precis som bergmodellen som dessutom innehåller tolkningar.

Beroende på vilken interpolationsmetod som används och inställningar i varje metod interpoleras ytorna olika. Detta kan innebära att olika flaskhalsar kan uppstå vilket skulle innebära att grundvattenytan skulle kunna variera kraftigt. I Visual MODFLOW flex användes inversa avståndsmetoden med standardinställningar då ingen annan metod eller inställning fungerade för att skapa en kontinuerlig yta för alla lagren. Detta kan bero på en kombination av punkternas placering tillsammans med inställningarna i de andra två metoderna i programmet och även att programmet ännu inte är optimalt för modellering då ändring av inställningar gjorde att ingen yta alls kunde skapas.

Randvillkoren som satts upp är inte helt representativa mot verkligheten. En vattendelare har inget flöde över sig i verkligheten vilket är representerat i modellen men dock kan inte berg antas vara impermeabelt. Då bergytan antas som ett randvillkor med inget flöde innebär detta att inget flöde kan ske i berget. Enligt tabell 2 stämmer detta inte utan berg är i många fall sprickigt och utgör en del av grundvattensystemet. Det högra randvillkoret CH2 ansattes då en osäkerhet fanns i var grundvattendelaren verkligen låg. Då detta randvillkor ersattes med randvillkoret inget flöde tycktes modellen svämma över något i

högra delen för att sedan rinna längs med kanten mot ån, CH1, vilket tolkades som att vattnet egentligen även flödar till magasinet som låg till höger om området. Det anses rimligt att använda CH2 då det är ett steady state fall som utvärderas och konstant hydraulisk potential därför kan anpassas efter den uppmätta grundvattenytan. Även om modellområdet inte helt följer ytvattendelaren anses inget flöde längs gränserna ändå rimligt då de ligger längs med höjder och grundvattenbildningen endast anges för den area som ligger innanför områdets gränser.

Grundvattenbildningen ansattes utifrån avläsning ur jordartskarta, se figur 4, vilket är en ganska osäker metod. Dessutom uppskattades grundvattenbildningen endast via kalibrering och det kan därför finnas fler möjliga parameterkombinationer som ej har testats. Då kalibrering utgick ifrån uppmätta värden på hydraulisk konduktivitet kan grundvattenbildningen ändå antas vara rimlig.

Då S_s och S_y ansattes till standard i modellen som är på $1 \cdot 10^{-5}$ 1/m respektive 20 % innebär det att detta möjligtvis inte är helt representativt för området. En S_y på 20 % innebär en ganska grovkorning jord innehållande sand och grus, se tabell 3, vilket innebär ett K på $3,4 \cdot 10^{-4}$ m/s till $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s, se tabell 2. Då friktionsjorden i området antogs ligga på $6,94 \cdot 10^{-5}$ m/s kan S_y antas representativt. Ett S_s på $1 \cdot 10^{-5}$ 1/m ligger i intervallet $3,3 \cdot 10^{-6}$ 1/m till $6,9 \cdot 10^{-5}$ 1/m vilket gäller för sprickigt berg, se tabell 4. Då området till stor del innehåller lera och friktionsjorden enligt tidigare resonemang antas bestå av sand och grus kan detta antas inkorrekt. Det är svårt att bedöma S_s och därför behövs S_s ändå som standard. Detta kan påverka vattenbalansen som kan se annorlunda ut om mer vatten kan avges från jorden. Båda dessa parametrar går att få av pumptester men har inte fått i detta fall.

Endast fyra fullständiga dataserier för grundvattennivå fanns i 21 rör inom modellenätet, varav tre inom det inaktiva området. De fyra dataserierna var från den 23 februari, 9 mars 2015, 23 mars 2015 och 20 april 2015. Referensdata var från den 9 mars och de andra seten ligger inom ett intervall på två månader. Då dessa ligger under samma årstid är parametrarna inte representativa för hela året. Detta syns tydligt redan i valideringen för de två senare seten som är torrare än de två första och grundvattenbildningen ger därför en för hög grundvattenyta och en sämre anpassning, se figur 34. Detta implicerar att data för en längre tidsperiod krävs för en robust modell som kan representera årsvariationer genom transient state istället för steady state.

Att det modellerade resultatet skiljer sig i form av olika utstickare då olika observationsobservationsrör används beror på modellens instabilitet till följd av att lagren inte är ihopkopplade och det är många torra celler. Det höga antalet iterationer tvingar modellen till att konvergera men innebär att resultatet inte är stabilt. Schlumberger Water Services som är ägare till programmet rekommenderar att närliggande celler bör överlappa varandra med 50 % för att skapa stabilitet och då bör 25 för maximalt antal yttre iterationer och 10 för maximalt antal inre iterationer vara nog för att modellen ska konvergera med den använda noggrannheten. Då friktionsjordslagret är mycket tunt i området går det tyvärr inte att koppla ihop cellerna utan en viss instabilitet var tvunget att

tillåtas för att modellen skulle kunna skapas. En högre noggrannhet hade möjligtvis kunna bidra till en mindre skillnad i resultat bland utstickarna.

6. SLUTSATSER

Generellt gäller att den hydrauliska konduktiviteten i det vattenförande lagret bidrar med störst skillnader i modellresultatet.

Var grundvattenbildning sker var minst lika viktigt som storleken. Högre belägna områden var viktigare då dessa fyller hela modellen. Låglänta områden får vatten ändå. Om inga andra randvillkor såsom konstant hydraulisk potential antas är grundvattenbildningen det enda som bidrar med vatten till de övre delarna. Detta antas också gälla för andra områden än detta.

Utspridda mätpunkter både för grundvattenyta och sonderingar gav bäst representation av verkligheten. Detta då utspridda punkter löper större chans att få med höjdpunkter och därför gav ett bättre resultat för denna studie.

Geologisk information om lagertjocklekar och bergytans läge är viktig för att få med flaskhalsar som kraftigt påverkar resultatet. Framförallt var bergets nivå viktig då det är främst denna som bestämmer formen för flaskhalsar i det vattenförande lagret. Sonderingar utgjorde i detta fall ett bra underlag för denna information.

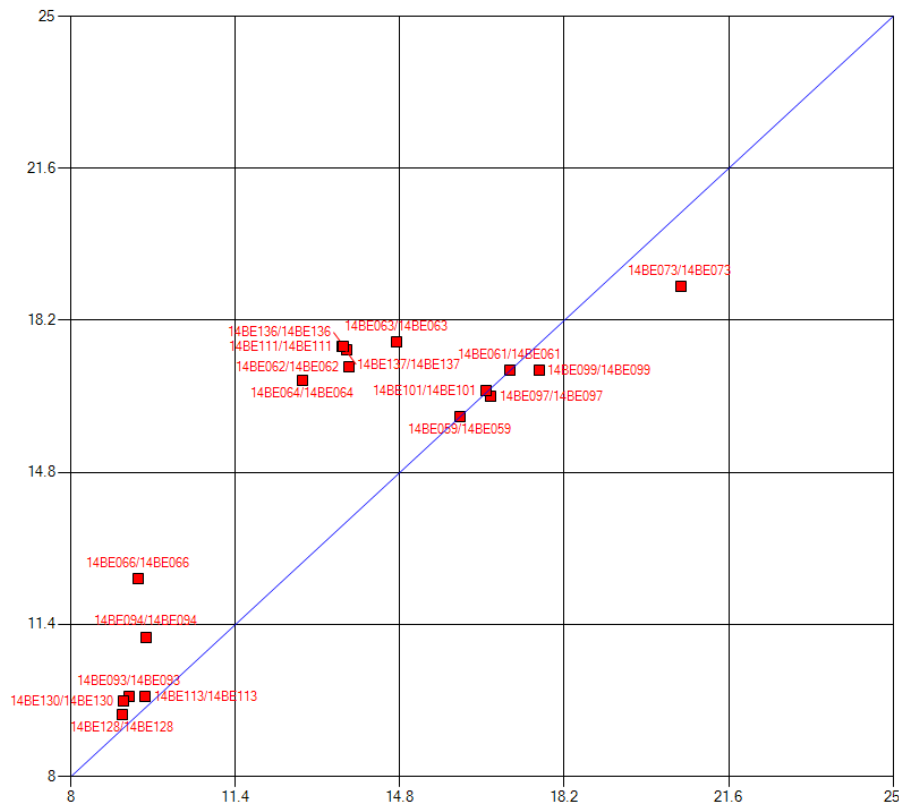
7. REFERENSER

- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Gulf Professional Publishing.
- Aschonitis, V.G., Antonopoulos, V.Z., Lekakis, E.H., Litskas, V.D., Kotsopoulos, S.A., Karamouzis, D.N., 2013. Estimation of field capacity for aggregated soils using changes of the water retention curve under the effects of compaction. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 688–698. doi:10.1111/ejss.12058
- Batu, V., 1998. Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis. John Wiley & Sons.
- Bear, J., 1988. Dynamics of Fluids in Porous Media. Courier Corporation.
- Clapp, R.B., Hornberger, G.M., 1978. Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties. *Water Resour. Res.* 14.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1998. Physical and Chemical Hydrology, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Heath, R.C., 1983. Basic Ground-Water Hydrology (No. 2220).
- Hesch, W., 2013b. Understanding MODFLOW-USG: A Comparison between Structured MODFLOW and UnStructured MODFLOW [WWW Document]. Schlumberger Water Serv. URL <https://www.swstechnology.com/blog/understanding-modflow-usg-a-comparison-between-structured-modflow-and-unstructured-modflow-1> (använd 01-27-2015).
- Johnson, R.H., 2007. Ground Water Flow Modeling with Sensitivity Analyses to Guide Field Data Collection in a Mountain Watershed. *Ground Water Monit. Remediat.* 27, 75–83. doi:10.1111/j.1745-6592.2006.00125.x
- Karlsson, R., Hansbo, S., 1984. Jordarternas indelning och benämning (Geotekniska laboratorieansvisningar No. 2). Stockholm.

- Kestin, J., Sokolov, M., Wakeham, W.A., 1978. Viscosity of Liquid Water in the Range -8°C to 150°C . J. Phys. Chem. Reference Data 7, 941–948.
- Kumar, C.P., 2015. Modelling of Groundwater Flow and Data Requirements. Int. J. Mod. Sci. Eng. Technol. 2, 18–27.
- Marklund, L., 2009. Topographic Control of Groundwater Flow (TRITA-LWR PhD 1052). KTH, Stockholm.
- Morris, D.A., Johnson, A.I., 1967. Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey 1948-60 (Myndighetsrapport). Washington.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., Pers, C., 2006. Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell (No. 66). Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära, Uppsala.
- Schlumberger Water Services, 2011. Visual MODFLOW Help. [WWW Document]. URL http://www.swstechnology.com/novamatrix/help/vmod/index.html?vm_ch9_output4.htm
- SMHI, 2014. Årsavdunstning medelvärde 1961-1990 [WWW Document]. URL <http://www.smhi.se/klimatdata/hydrologi/vattenstand-2-2-338/arsavdunstning-medelvarde-1961-1990-1.4096> (använd 02-05-2015).
- SMHI, u.d. SMHI - Årsnederbörd i millimeter [WWW Document]. URL <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/kartor/monYrTable.php?par=nbdYr&month=13> (använd 5.22.15).
- Svenska Geotekniska Föreningen (SGF), 2012. Metodbeskrivning för jordbergsondering: Utförande, utrustning och kontroll (No. 4:2012). Linköping.
- Svenska Geotekniska Föreningen (SGF), 1999. Metodbeskrivning för viktsondering (No. 3:99). Linköping.
- Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) och Byggnadsgeologiska Sällskapet (BGS), 2001. Beteckningssystem för geotekniska utredningar (No. 2001:2).
- Yan, T., Burbey, T.J., 2008. The Value of Subsidence Data in Ground Water Model Calibration. Ground Water 46, 538–550. doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00439.x

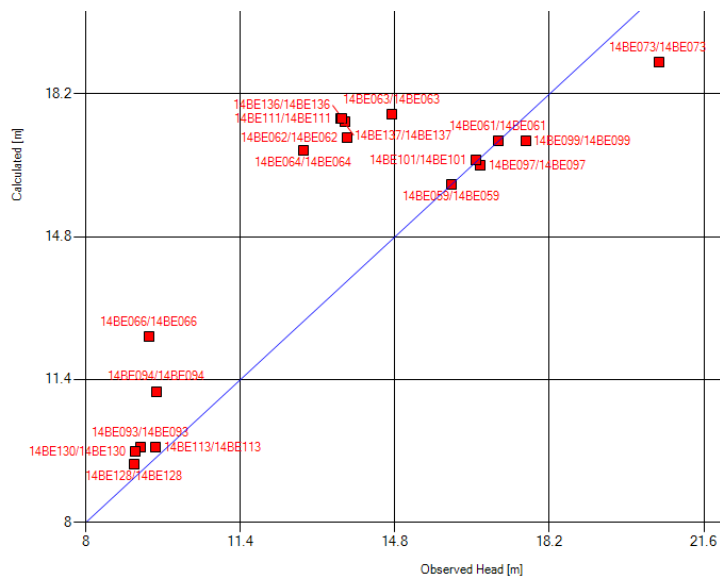
8. BILAGA

Graferna nedan visar uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde för varje experiment.

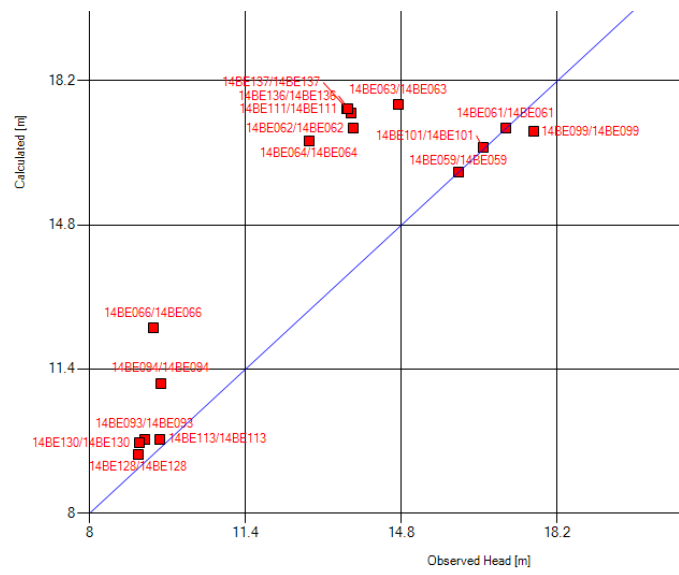


Figur 36. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. De fyra observationsrören 14BE072, 14BE075, 14BE098 och 14BE100 är inaktiva varav 14BE072, 14BE075 och 14BE098 ligger i det inaktiva fältet och därför bör vara inaktiva. En inaktiv observationsrör kan också innebära att inget vatten finns i cellen för observationsrören som för 14BE100. Den röda texten utgör namn på observationsrören. Från vänster till höger: 14BE128, 14BE130, 14BE098, 14BE113, 14BE094, 14BE066, 14BE064, 14BE062, 14BE111, 14BE136, 14BE137, 14BE063, 14BE059, 14BE101, 14BE097, 14BE061, 14BE099, 14BE073.

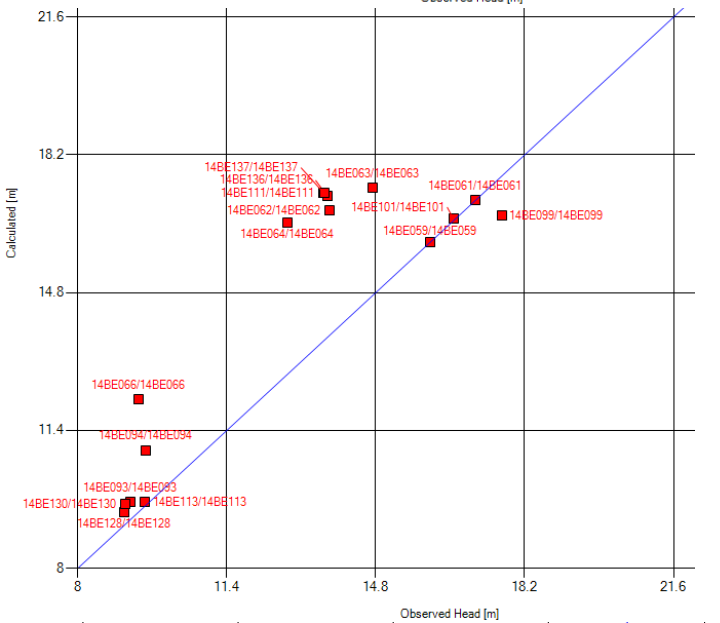
a)



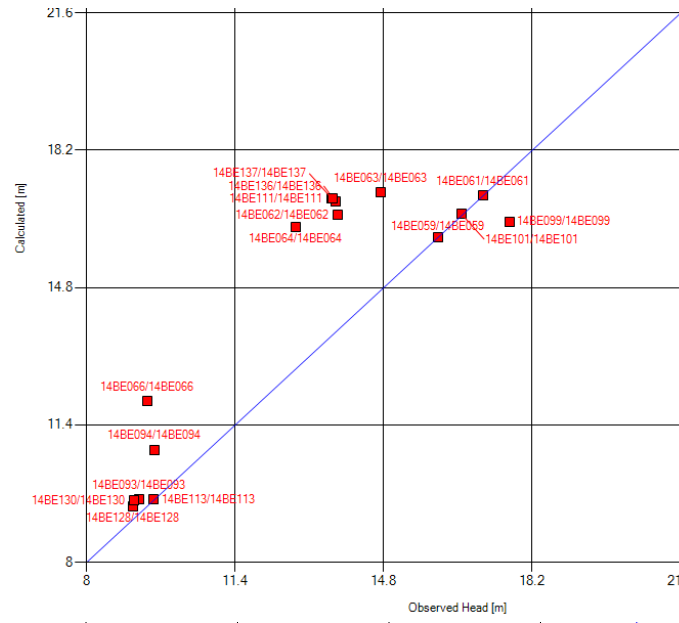
b)



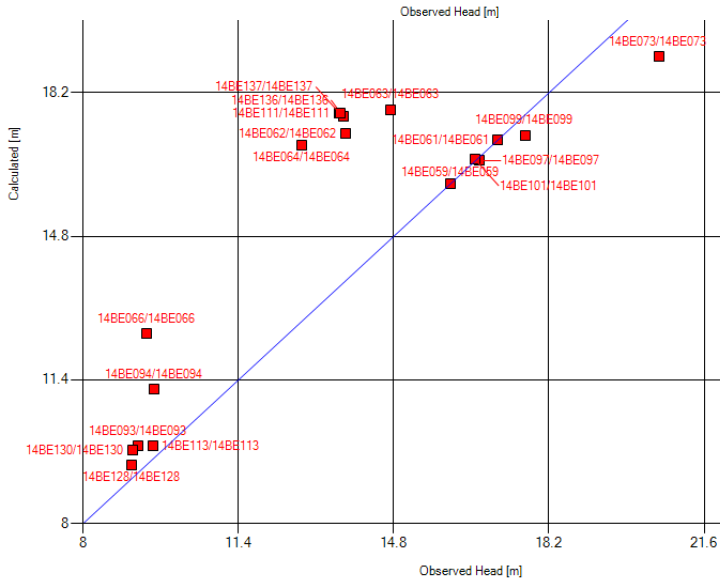
c)



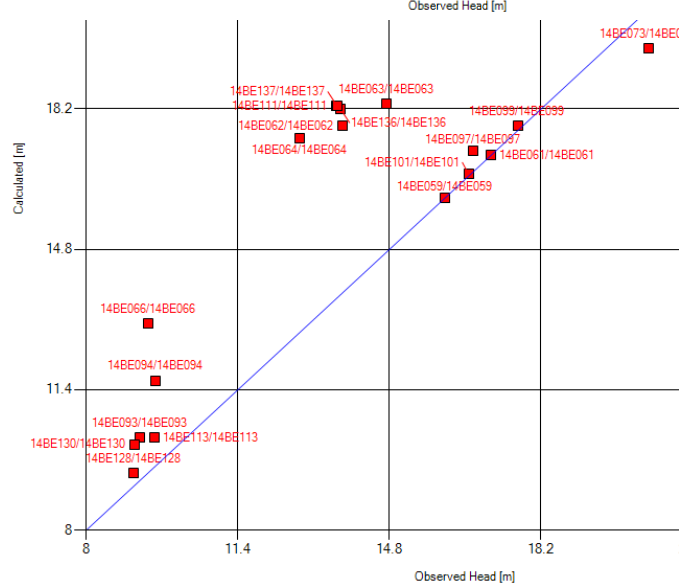
d)



e)

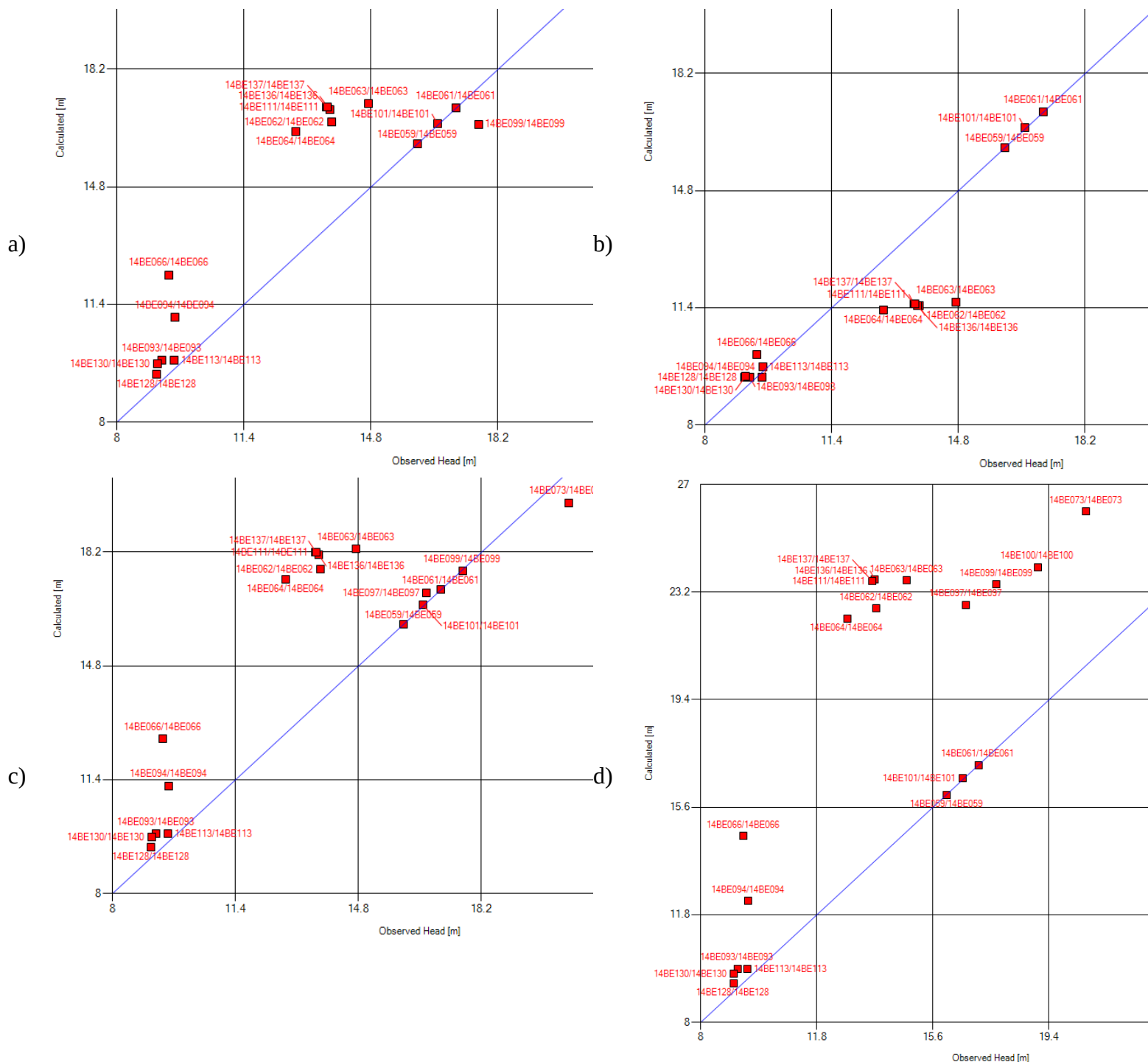


f)



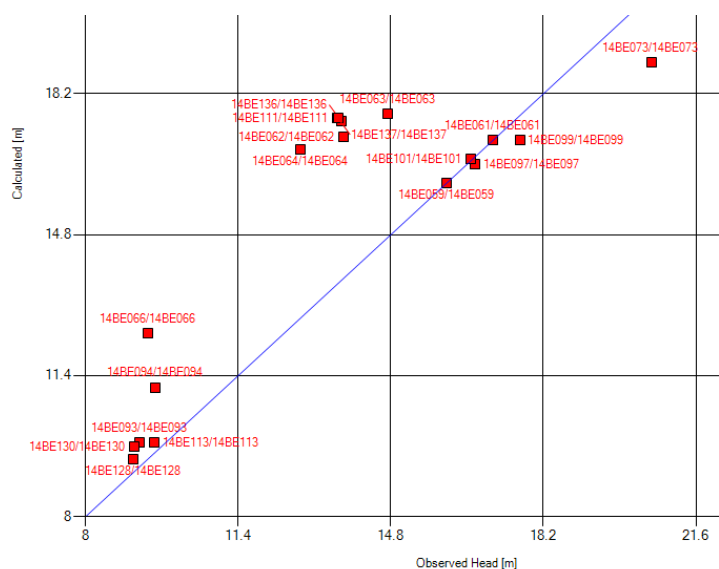
Figur 37. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet (a) och försök 1 med en ökning i hydraulisk konduktivitet för leran med 10 % (b), 50 % (c) och 100 % (d) samt en

minskning med 10 % (e) och 50 % (f). De röda punkterna med röd text är de olika observationsrören.

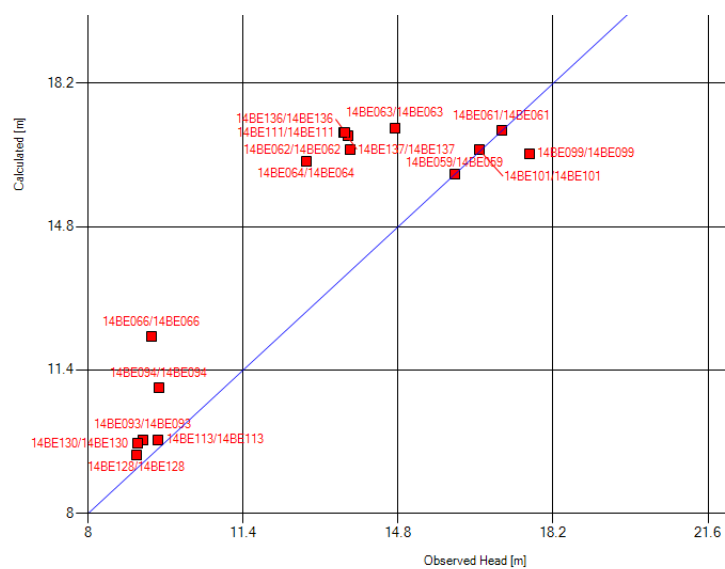


Figur 38. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Försök 2 med en ökning i hydraulisk konduktivitet för friktionsjorden med 10 % (a), 50 % (b) samt en minskning med 10 % (c) och 50 % (d). Försök 2 för 100 % ökning i friktionsjord blev torr och visade inga resultat.

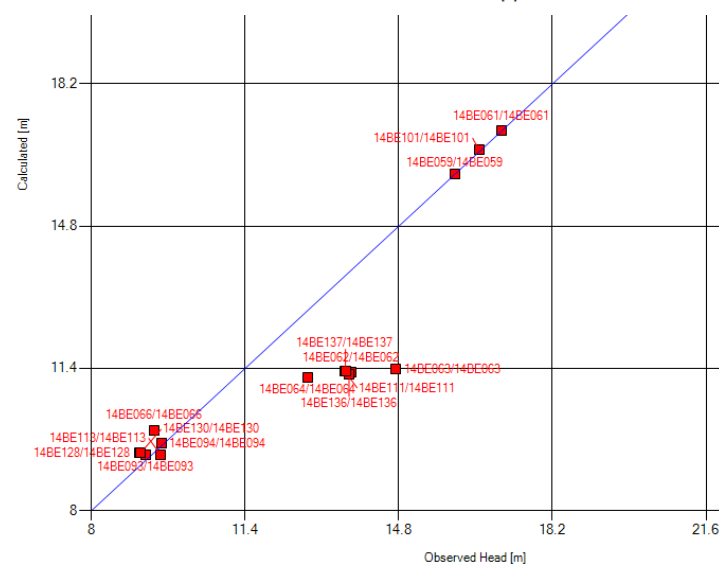
a)



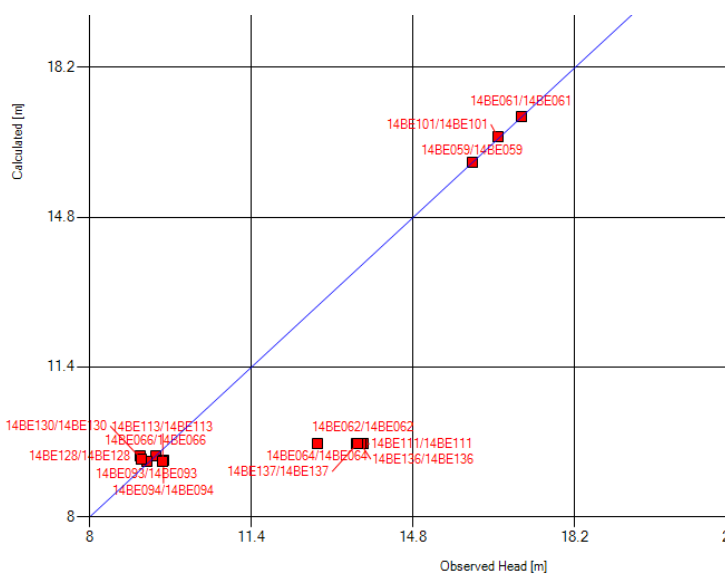
b)



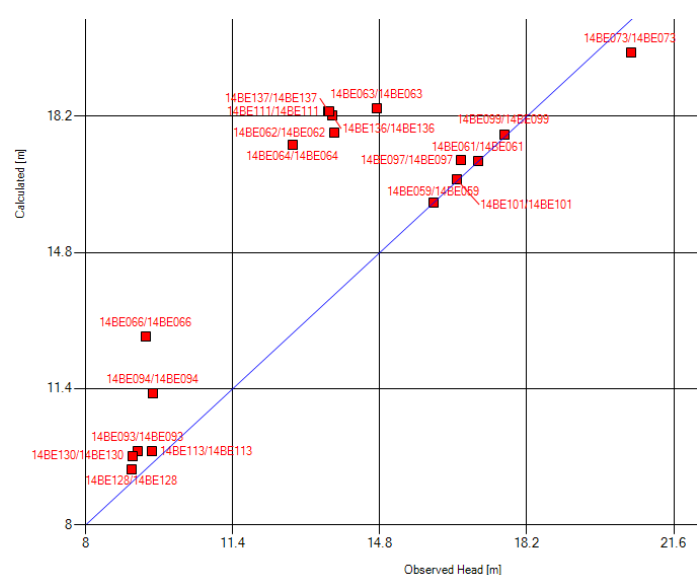
c)



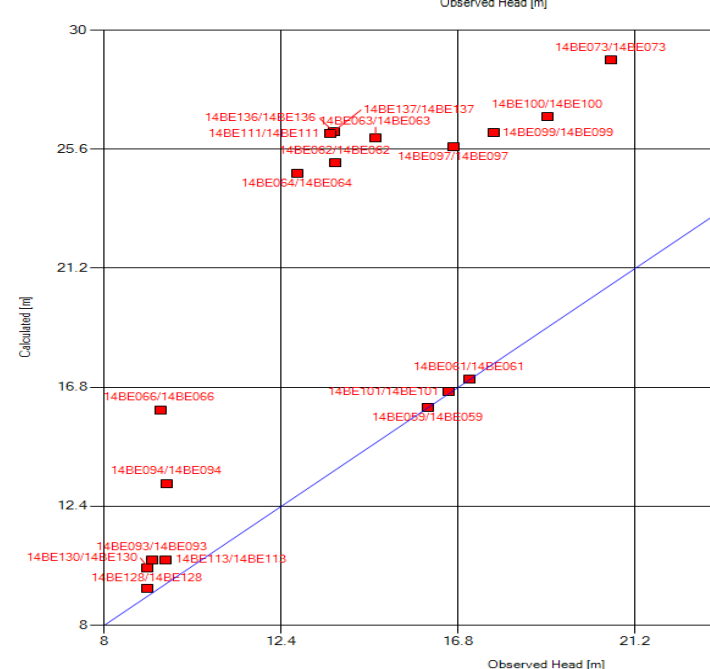
d)



e)

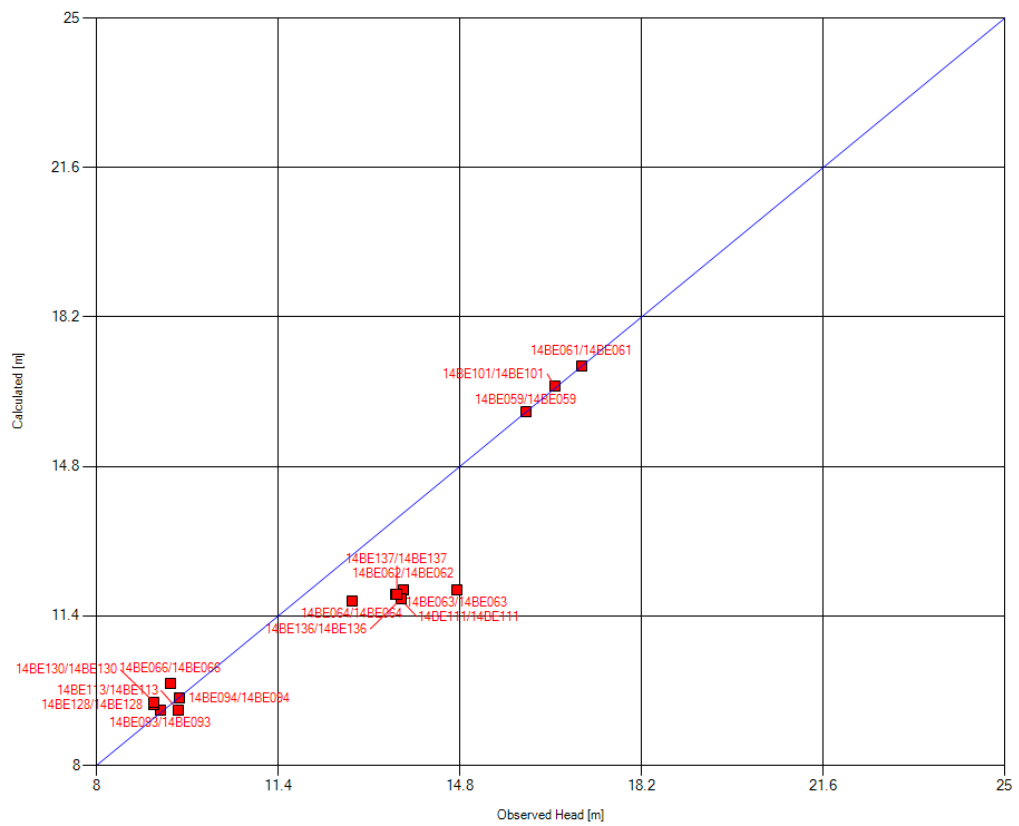


f)

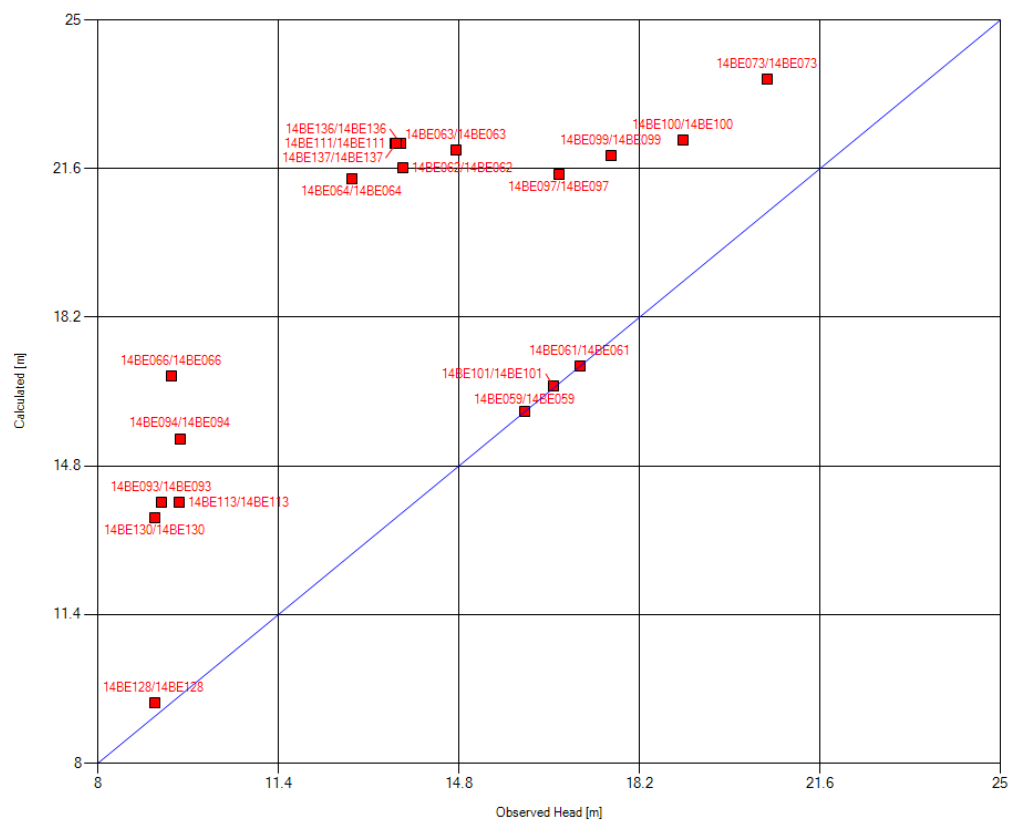


Figur 39. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet (a) och försök 3 med en ökning i hydraulisk konduktivitet för båda lagren med 10 % (b), 50 % (c) och 100 % (d) samt en minskning med 10 % (e) och 50 % (f).

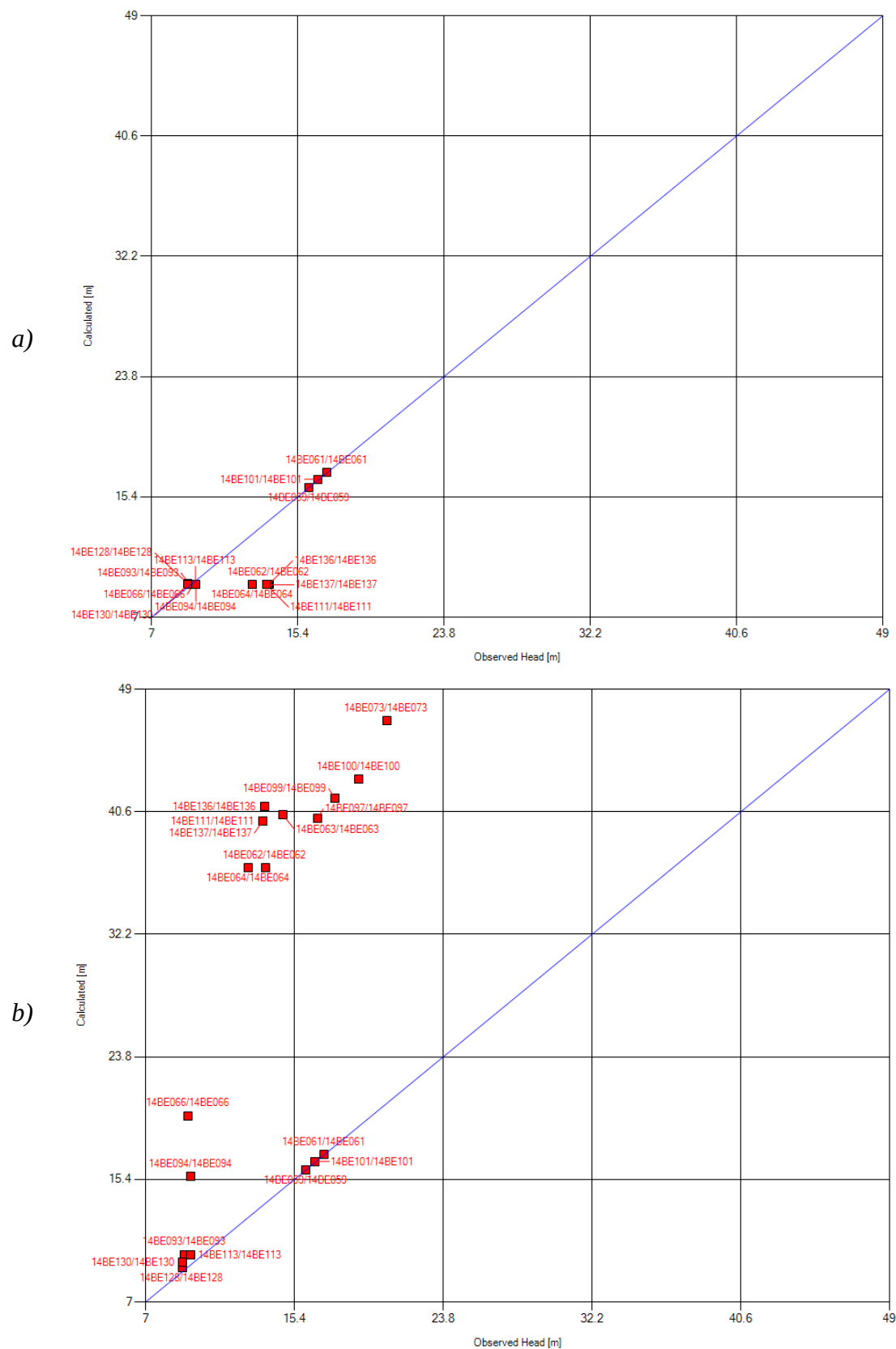
a)



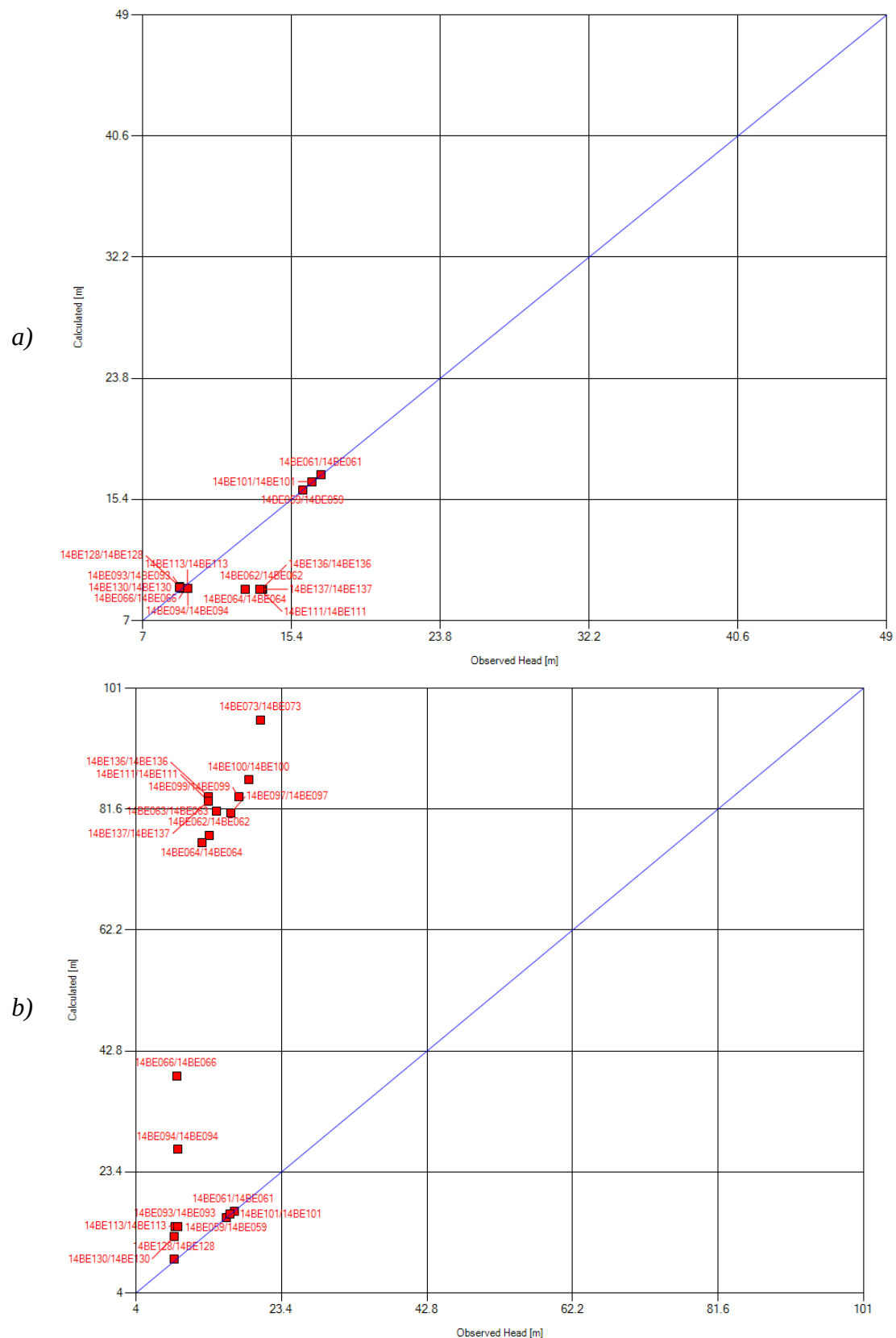
b)



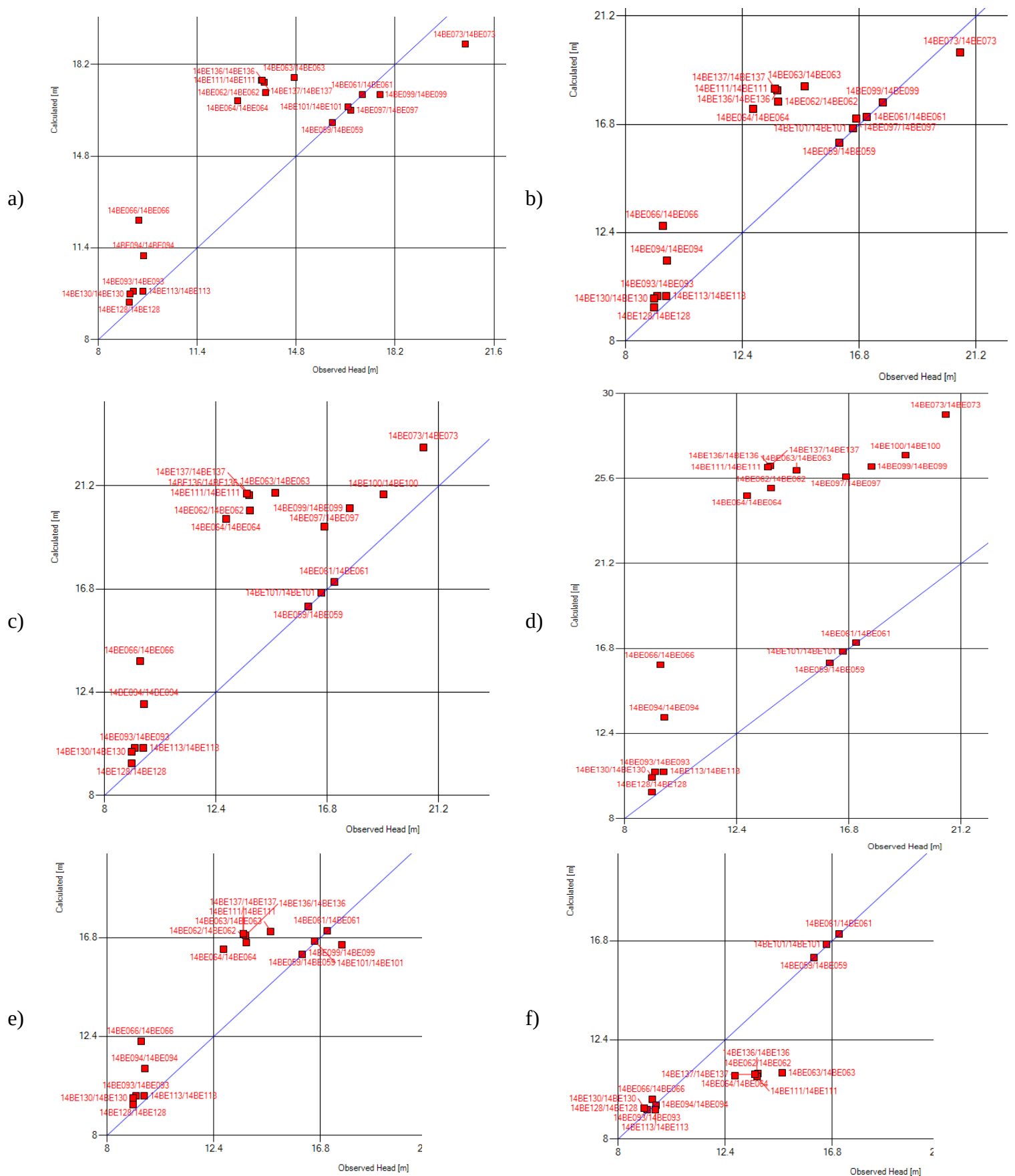
Figur 40. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. En ökning i hydraulisk konduktivitet med en tiopotens för leran (a) samt en minskning med en tiopotens (b).



Figur 41. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. En ökning i hydraulisk konduktivitet med en tiopotens för friktionsjorden (a) samt en minskning med en tiopotens (b).

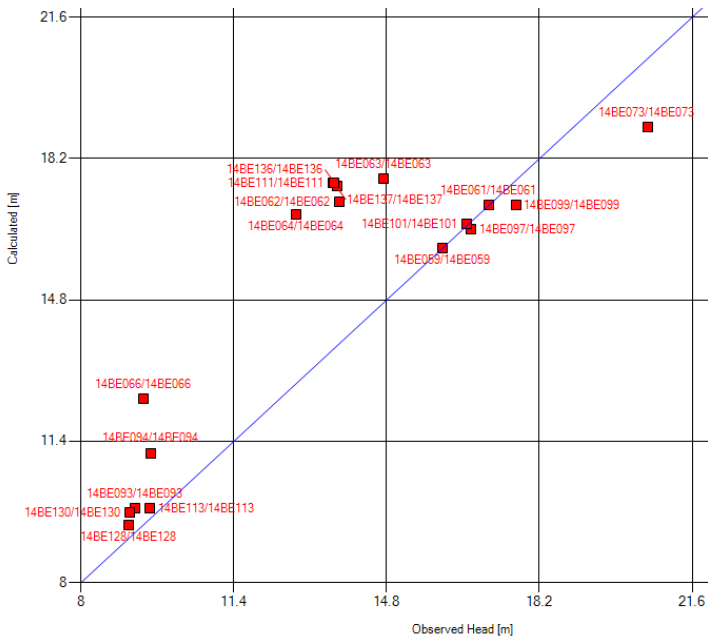


Figur 42. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsobservationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. En ökning i hydraulisk konduktivitet med en tiopotens för båda lagren samtidigt (a) samt en minskning med en tiopotens (b).

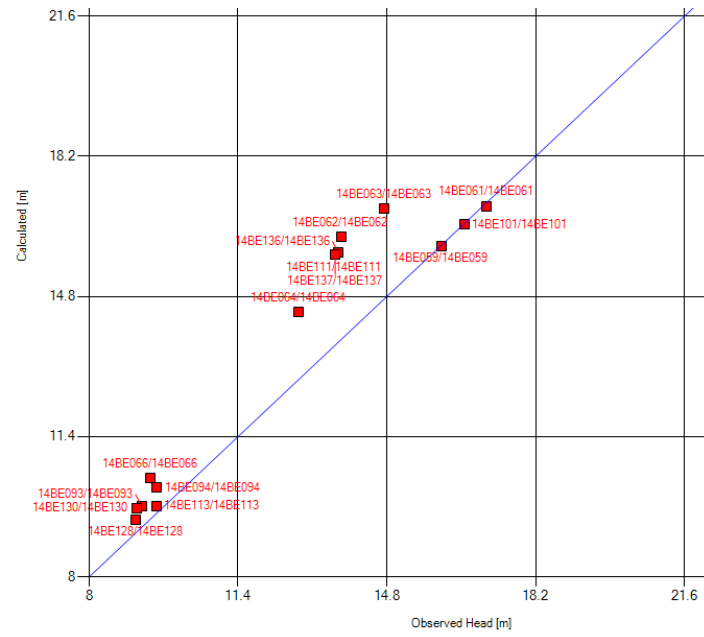


Figur 43. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet (a) och en ökad grundvattenbildning med 10 % (b), 50 % (c) och 100 % (d) samt en minskad grundvattenbildning med 10 % (e) och 50 % (f).

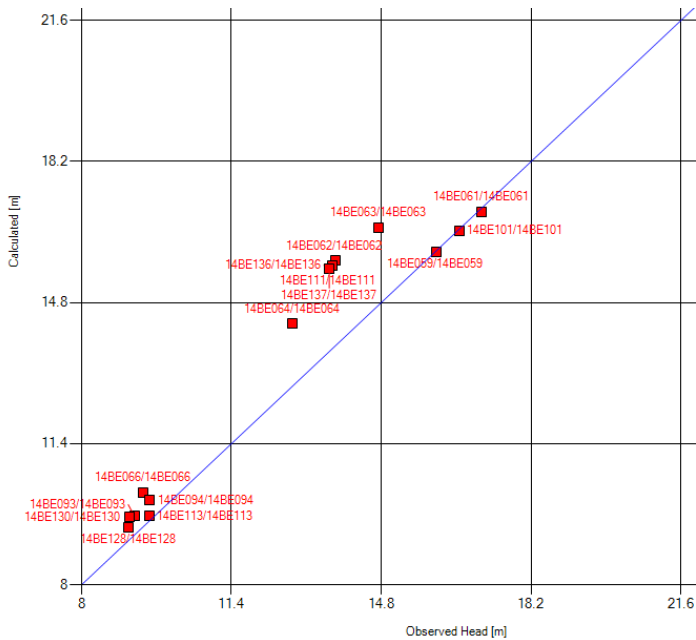
a)



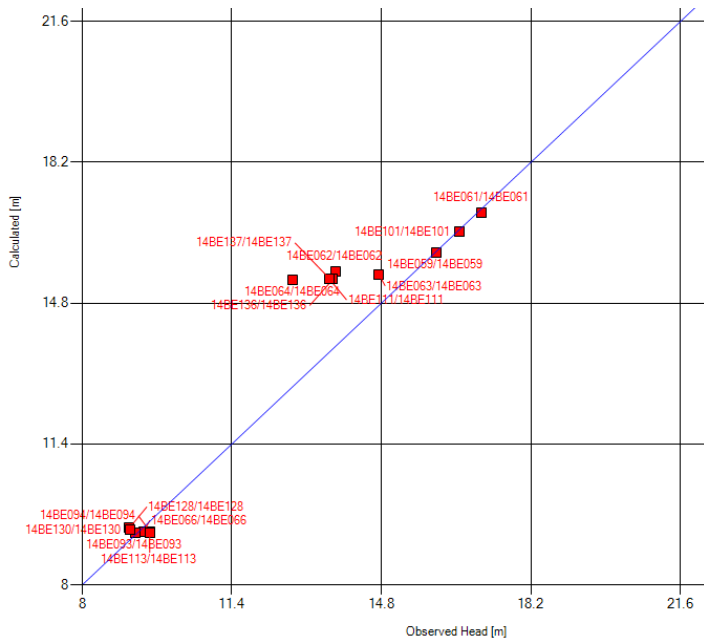
b)



c)

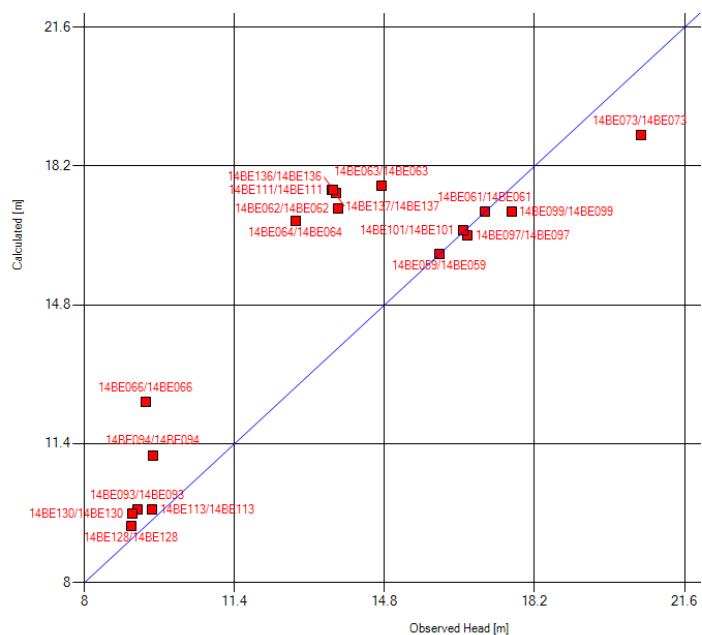


d)

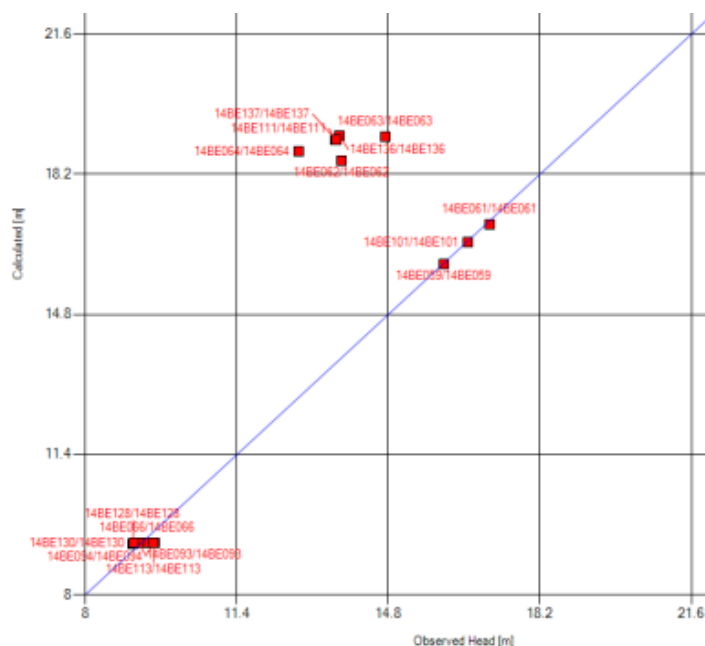


Figur 44. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Det är bättre NRMS för MMS med likadan grundvattenbildning som för referensfallet (b) än för referensfallet (a). Ännu bättre NRMS uppnås då appliceringsområdena ändras (c) men bäst NRMS uppnås då grundvattenbildningen flyttas och ett område tas bort (d).

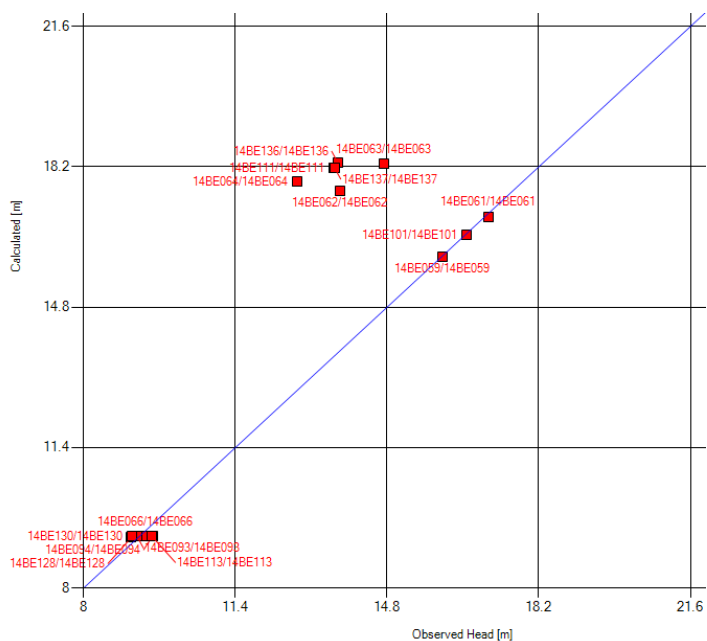
a)



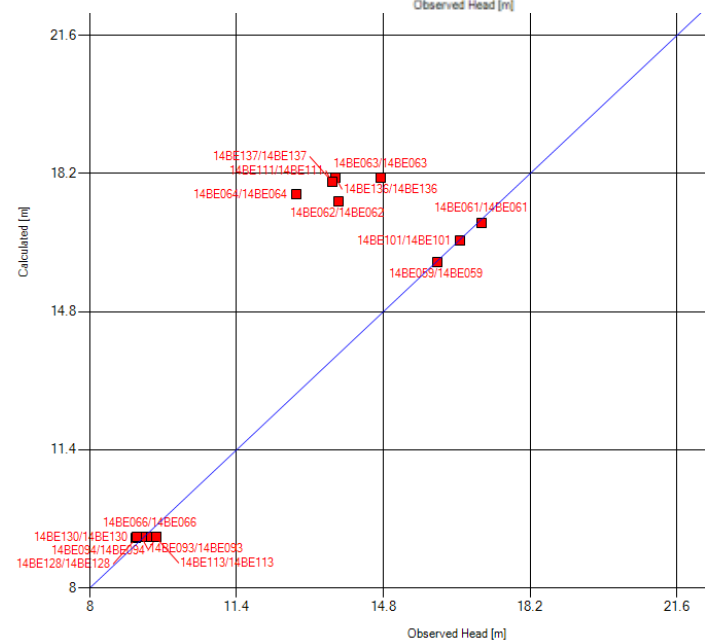
b)



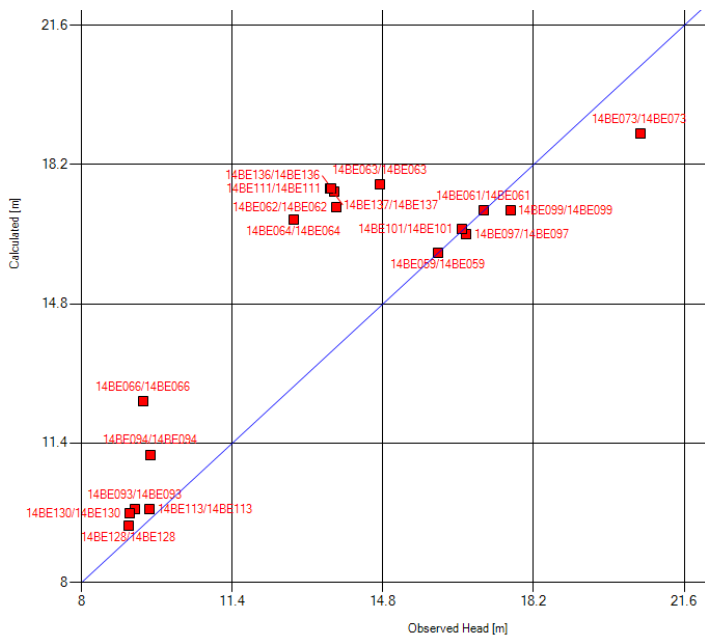
c)



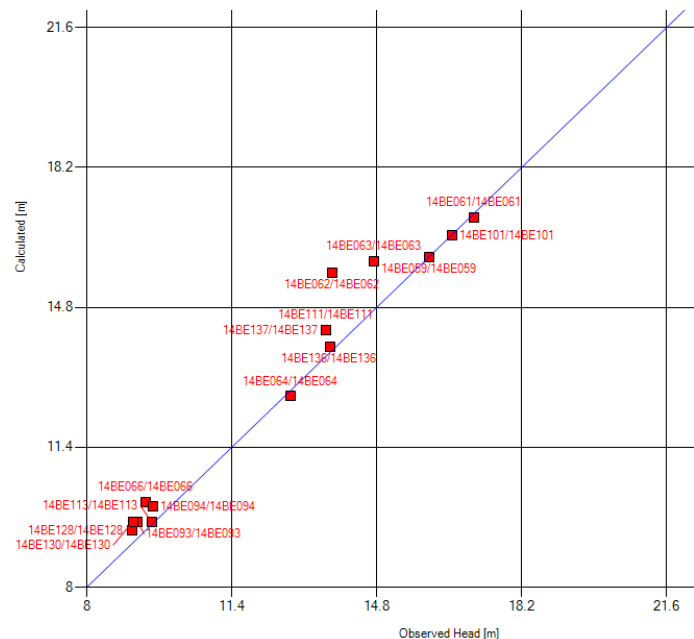
d)



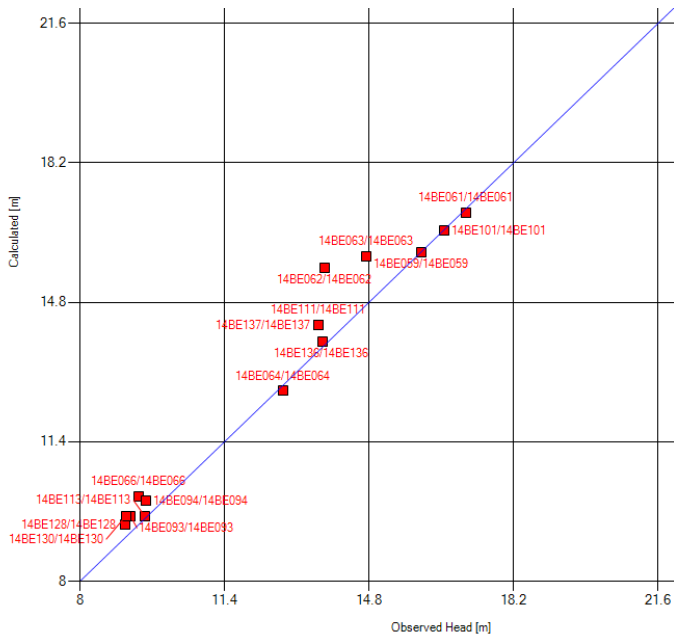
Figur 45. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet (övre vänster), SMS med en grundvattenbildning enligt referensfallet (övre höger), SMS med förändrad plats för applicering av grundvattenbildning (nedre vänster) samt SMS med förändrats plats och ett borttaget område för grundvattenbildning (nedre höger).



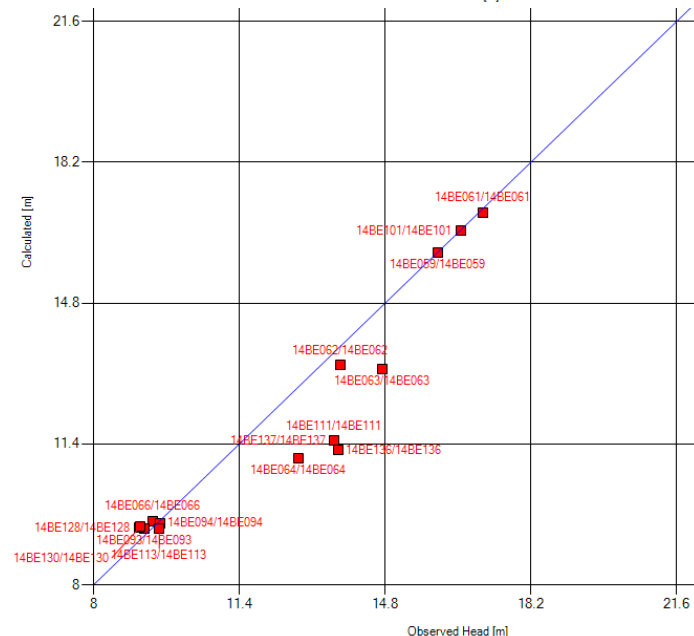
b)



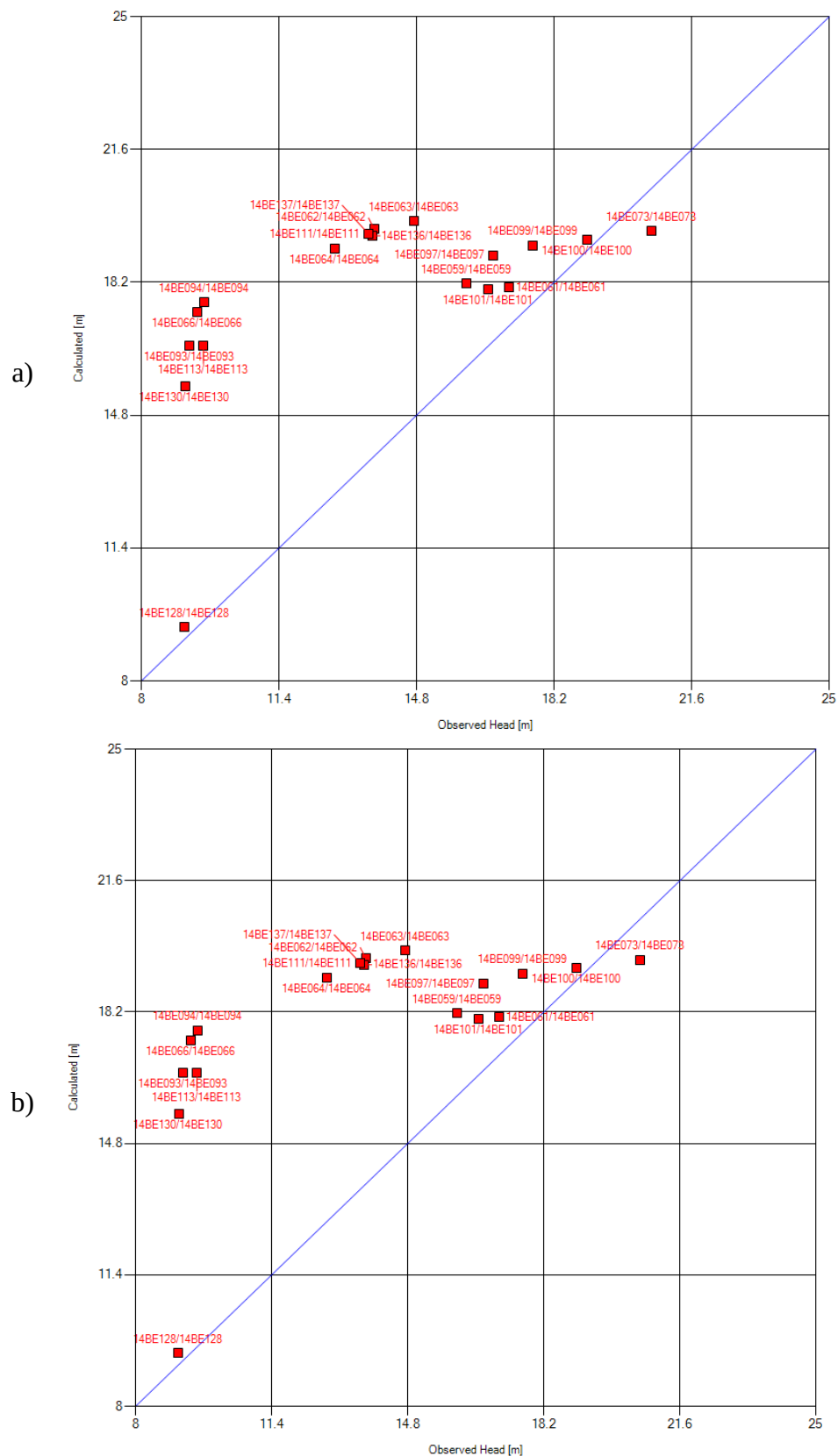
c)



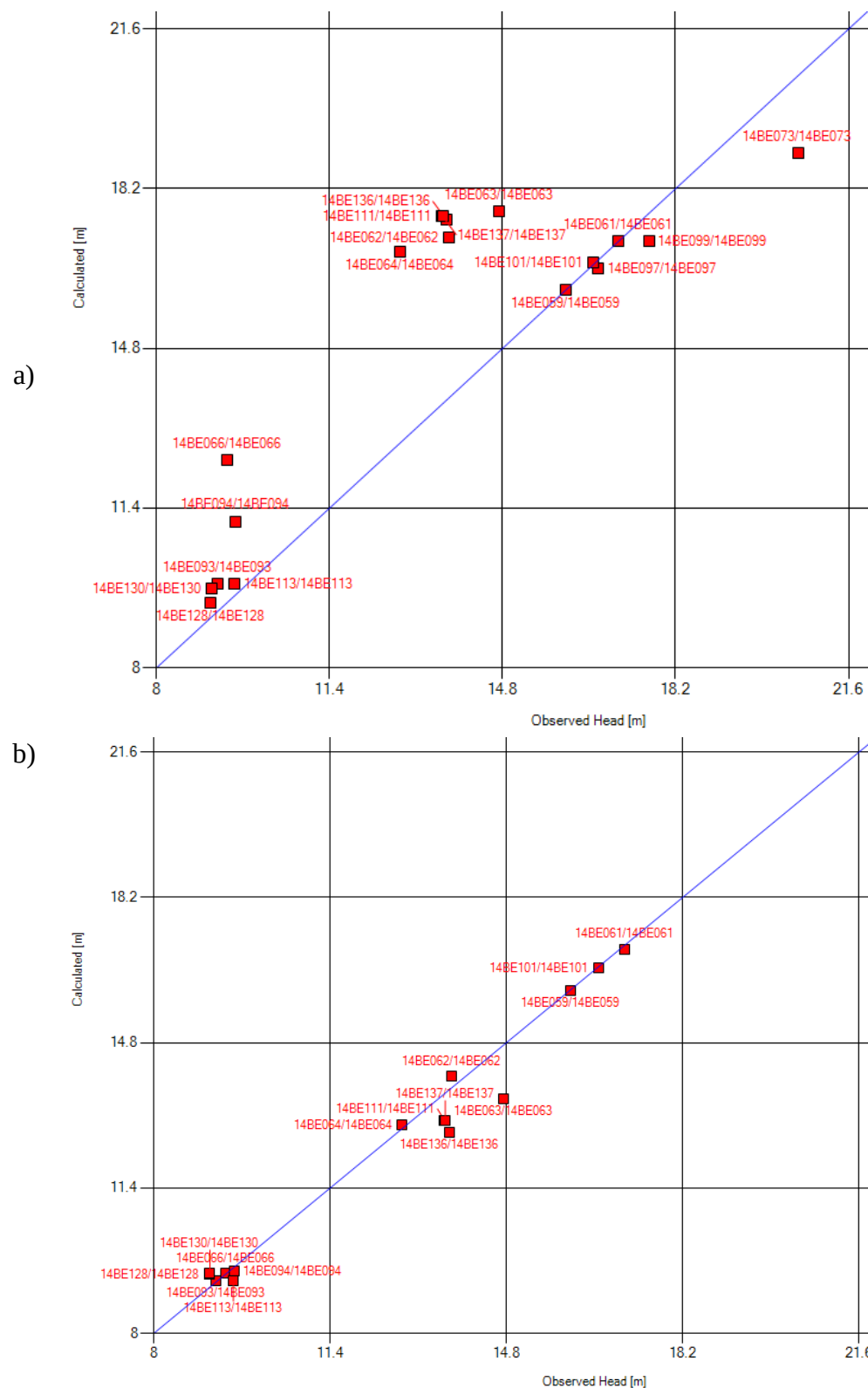
d)



Figur 46. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet (a), MMSh då grundvattenbildning appliceras på samma områden som i referensfallet (b), MMSh med ett extra grundvattenbildningsområde (c) och med endast två grundvattenbildningsområden (d).

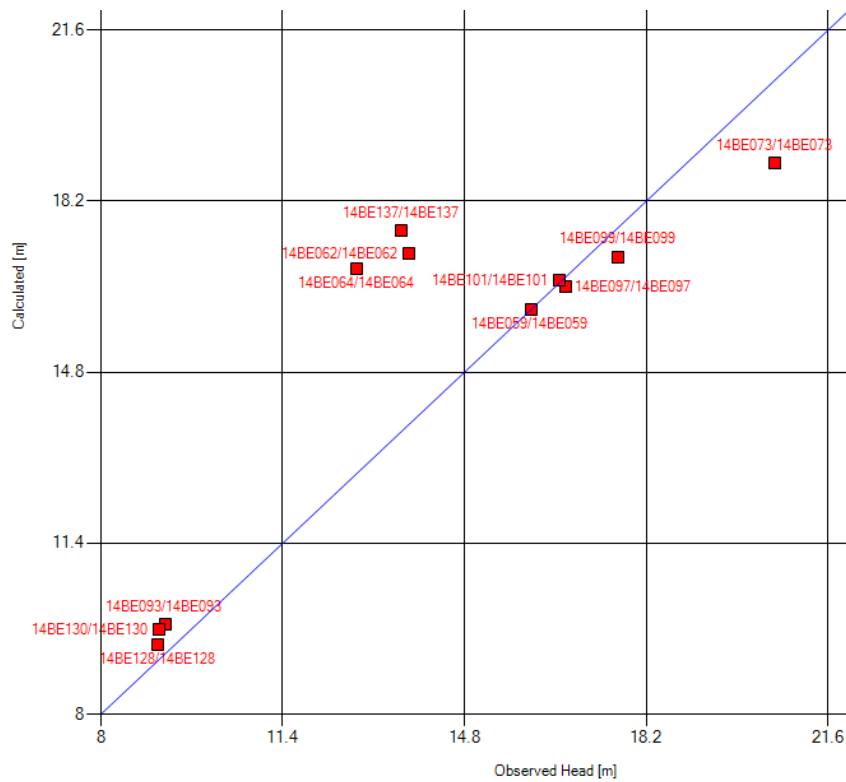


Figur 47. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsobservationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Platt bergsyta med en grundvattenbildning som för referensfallet (a) och platt bergsyta med grundvattenbildning för alla områden med friktionsjord i dagen (b).

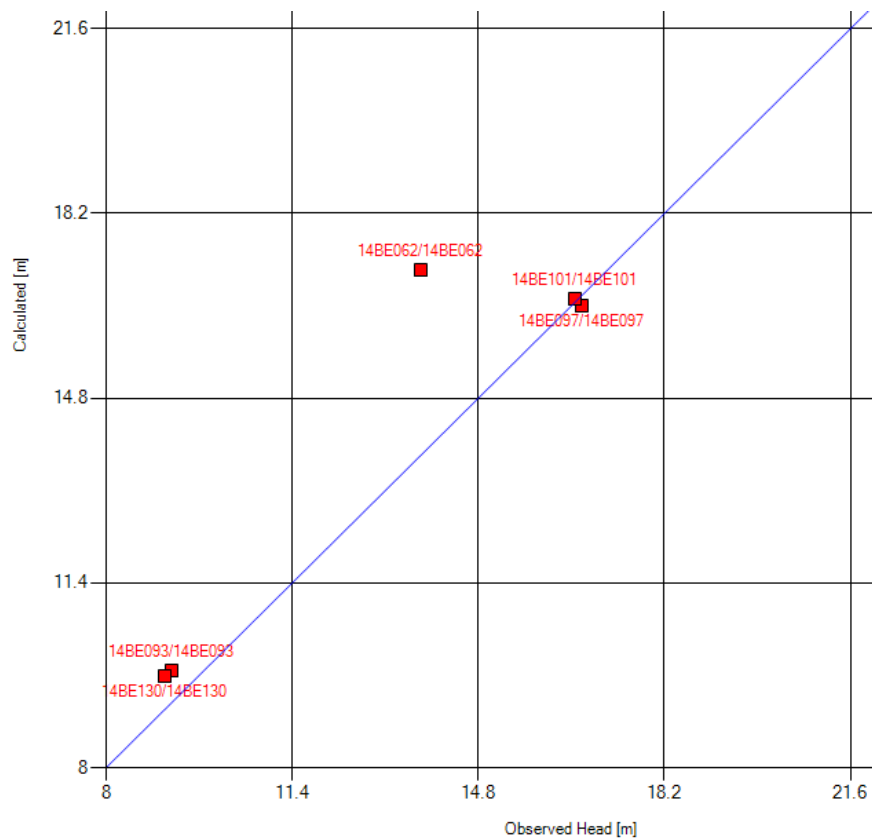


Figur 48. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. En zon med ett medelvärde för konduktiviteten (b) har bästa NRMS av alla modeller. Även bättre än referensfallet (a).

a)

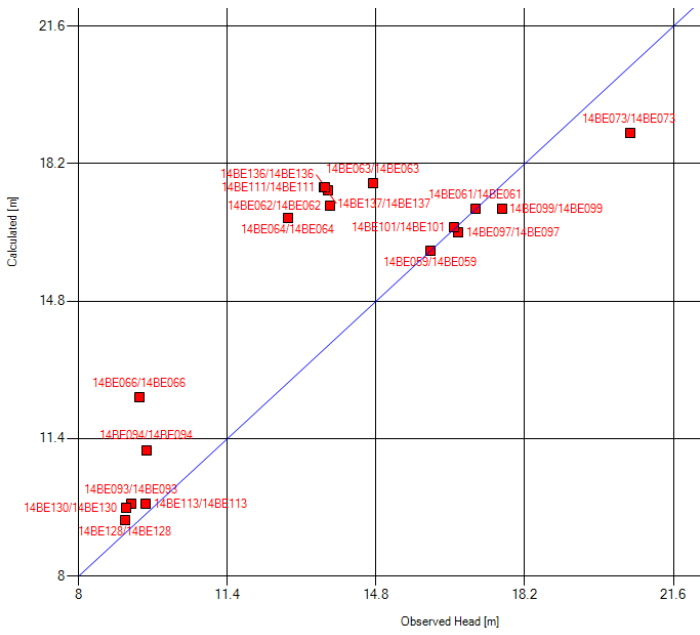


b)

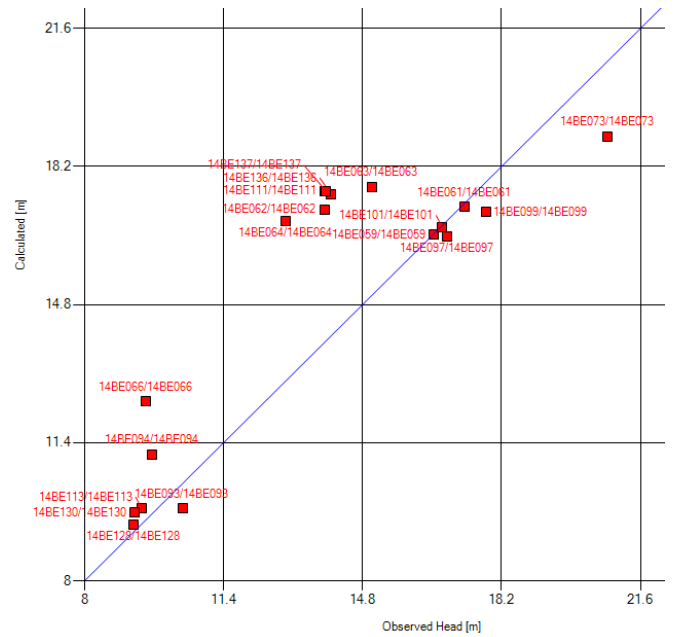


Figur 49. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet med halva mängden observationsrör (vänster) och en fjärdedel av mängden observationsrör (höger).

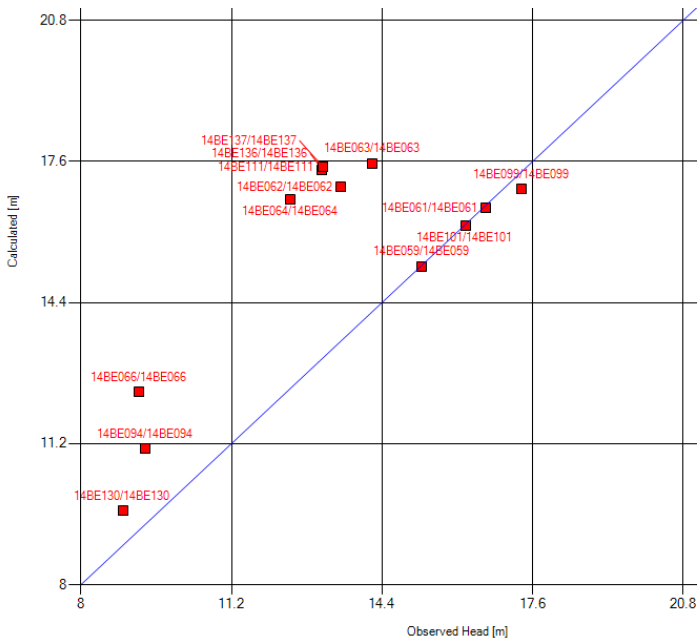
a)



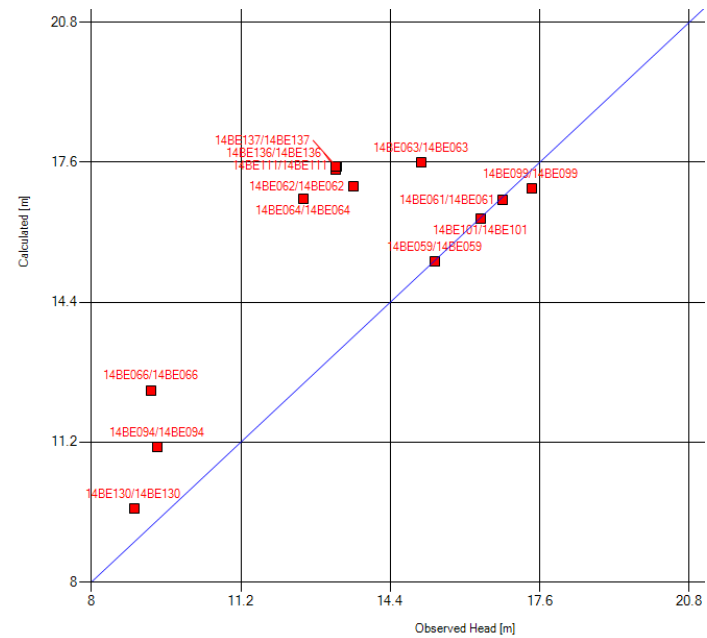
b)



c)



d)



Figur 50. Grafen visar de uppmätta grundvattennivåerna för varje observationsrör jämfört med uträknat värde. Den röda texten utgör namn på observationsrören se 3.4 för ordning. Referensfallet (a), valideringsset 1 (b), valideringsset 2 (c) och valideringsset 3 (d).