



Stockholm
University

Bachelor Thesis

Degree Project in
Geochemistry 15 hp

Studie av ursprung av vatten i Rotebro

Jenny Olsson



Stockholm 2013

Department of Geological Sciences
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Inledning.....	5
Bakgrund	6
Isotoper.....	6
Syre- väteisotoper ($\delta^{18}\text{O}$, δD)	7
Svavel ($\delta^{34}\text{S}$).....	8
Metaller	9
Järn (Fe) och mangan (Mn)	10
Arsenik	10
Metallens bindning i mark	11
Vattnets transport genom mark	11
Geologi.....	12
Stockholmsåsen	12
Hydrologi.....	14
Utförande	17
Provtagning av grundvatten	17
Provtagning Norrviken.....	19
Bestämning av $\delta^{18}\text{O}$ och δD.....	19
Förberedelser.....	19
Analys.....	19
Bestämning av $\delta^{34}\text{S}$.....	19
Förberedelser.....	19
Analys.....	21
Bestämning av metaller	22
Förberedelser	22
Analys.....	22
Resultat och diskussion	23
Fältmätningar	23
δD , $\delta^{18}\text{O}$ vs. V-SMOW	24
$\delta^{34}\text{S}$ vs. CDT (‰)	25
Metaller	25
Spårämnen	25
Mangan och järn	28
Dricksvattenkvalitet	30
Sammanfattning.....	31
Slutsatser	31
Referenser	33
Internet	34
Bilder	34
Appendix	35

Sammanfattning

Ursprung av vatten har undersökts för Stockholms reservvattentäkt i Rotebro, där en ny bro byggs över järnvägen. Provtagning av sex installerade grundvattenrör har skett vid tre tillfällen, september, december och januari, för analys av isotopsammansättningen hos $\delta^{18}\text{O}$ och δD , samt sulfat ($\delta^{34}\text{S}$). Med hjälp av ICP-OES har även metallhalter analyserats. Grundvattenmagasinet är en del av Stockholmsåsen, som är den rullstensås som sträcker sig från Västerhaninge vidare norrut mot Arlanda. Åsen består av isälvsmaterial och är i detta undersökta område mestadels täckt av lera en varierande mäktighet mellan 10 meter till 1 meter. Inom området för grundvattenmagasinet finns bostadsområden, en större väg samt en fabrik, Jästbolaget, som pumpar upp grundvatten för kylningsändamål. Området kring Rotebro utgör ett av Sveriges mest trafikerade områden. Längs grundvattenmagasinets östra sida är sjön Norrviken belägen.

Tillrinningsområdet skiljer sig hos grundvattenrören. Isotopsammansättningen för $\delta^{18}\text{O}$ och δD har i rör N11-23GW och N11-19GW, som är de rören som befinner sig österut närmast Norrviken, varit liknande Norrvikens vilket tyder på infiltration från sjön.

Isotopsammansättningen för svavel har varierat från +1,9 ‰ i rör N11-04GW till -1,23 ‰ i rör N11-09GW vilket tyder på att bakteriell sulfatreduktion har ägt rum där anrikning av sulfider finns i grundvattnet. Rör N11-04GW är det rör som visar positiva värden och som därför har en annan svavelkälla.

Grundvattnet har förhöjda koncentrationer av järn, mangan, arsenik. I vissa av rören överstiger halterna de uppsatta gränserna för vad som är hälsosamt enligt Livsmedelsverket. Förhöjda halter av järn och mangan kan troligen delvis förklaras av grundvattenrörens konstruktion och av att vissa av rören påverkas av mer siltiga jordlager. Förekomsten av arsenik är troligen naturlig. Grundvattenrören som får infiltration från Norrviken visar på lägre halter.

Inledning

Trafikverket bygger en ny bro över järnvägen i Rotebro, i anslutning till E4an. Området är skyddat enligt Länsstyrelsen för att värna om grundvattenmagasinet som utgör reservvattentäkt för Stockholmsområdet, den så kallade Rotsundavattentäkten. För att kontrollera att bygget inte påverkar grundvattnet negativt sker regelbundna provtagningar i området. Detta görs genom provtagning av grundvatten från sex fasta och installerade grundvattenrör. Hifab genomför sedan våren 2011 provtagningar inom ramen för ett kontrollprogram. Kontrollprogrammets syfte är att kontrollera att brobyggnationen inte ger upphov till negativa förändringar i grundvattnets kvalitet jämfört med bakgrundshalter. Resultaten har påvisat att det finns skillnader i vattenkemin mellan de olika rören, bland annat skillnader i halter av järn och mangan. Syftet med denna studie är att undersöka isotopsammansättningen ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{34}\text{S}$) samt metallhalter i grundvatten för att undersöka om skillnaderna i vattenkemin mellan de olika grundvattenrören kan bero på ursprunget hos vattnet. Denna studie omfattar resultat från två provtagningstillfällen, i början av december 2012 och slutet av januari 2013. Prover från september 2012 har även analyserats.

Bakgrund

Ursprunget av vattnet kommer framförallt att undersökas genom analys av isotopsammansättningen i vatten (syre och väte, $\delta^{18}\text{O}$, δD), analyser av svavelisotoper i sulfat ($\delta^{34}\text{S}$) samt analys av metallhalter med ICP-OES för att få en mer tydlig bild av vattnens sammansättning. Svavelisotoper i sulfat gör det möjligt att bland annat spåra var svavlet kommer ifrån genom att sulfider har en skild isotopsammansättning från svavel som härrör från nederbörd och därför kan ursprunget undersökas.

Isotoper

Isotoper av ett grundämne har samma antal av protoner i kärnan, men ett annat antal av neutroner. De har alltså samma atomnummer, men en annan atomvikt. Isotoper kan antingen vara stabila eller radioaktiva. Stabila isotoper sönderfaller inte naturligt, medan radioaktiva gör det genom radioaktivt sönderfall. De radioaktiva isotoperna är alltså inte stabila utan sönderfaller till andra grundämnen. De så kallade moderisotoperna övergår till dotterisotoper och energi i form av alfa-sönderfall eller beta-strålning frigörs (Faure and Mensing, 2005). De radioaktiva isotoperna används huvudsakligen för att bestämma ålder genom dess halveringstid, som är konstant. Man använder de isotoperna för att bestämma ålder, veta ursprungsberget och vilka processer som skett (Drever, 1988).

Stabila isotoper av väte och syre i vatten används för att undersöka källan av vattnet, eller för att se vilka processer som påverkat vattnet sedan det fyllde akvifären. Isotoper av samma ämne agerar likadant då ämnets kemiska egenskaper bestäms av atomnumret (Drever, 1988), men på grund av masskillnaden har de andra fysikaliska och kemiska egenskaper. Skillnaderna ligger alltså i massan, och vi ser det tydligast hos de lättare ämnena då skillnaderna i massa blir som störst, som till exempel för syre 18 och 16. Detta orsakar en så kallad isotop fraktionering av isotoperna, en process som gör att olika isotoper anrikas olika. Fysiska processer, så som evaporation, kondensation, smältning, kristallisering, absorbering, desorbition samt diffusion är en den vanligaste orsaken av fraktionering. Dock förekommer även isotopfraktionering som resultat av biologiska och kemiska processer (Eby, 2003) genom att reaktionshastigheterna skiljer för den lättare respektive tyngre isotopen. Orsaken till detta är att det är lättare att bryta bindningar i föreningar som har den lättare isotopen jämfört med den tyngre, vilket leder till anrikning (Hoefs, 1973).

Ett exempel på isotopfraktionering är när evaporation av vatten som leder till att de lättare isotoperna (^1H och ^{16}O) blir till gas medan de tyngre Deuterium (D) ^{18}O blir kvar som vätskefas. Därför har regnvattnet högre halter av ^1H och ^{16}O , medan det i havet anrikas på D och ^{18}O . Ett annat exempel på fraktionering av isotoper är de biogena processerna som påverkar förhållandet för $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ när bakterier i syrefattig miljö bryter ner sulfatet till svavelväte, även kallat bakteriell sulfatreduktion (Krouse and Grinenko, 1991).

Isotopvärden mäts som förhållanden hos isotoperna och beskrivs som avvikelser till en given standard och uttrycks som ett standardvärde (δ) och mäts vanligen i promille (‰).

$$\delta(‰) = (R_{\text{std}}/R_{\text{sample}} - 1) \times 1000$$

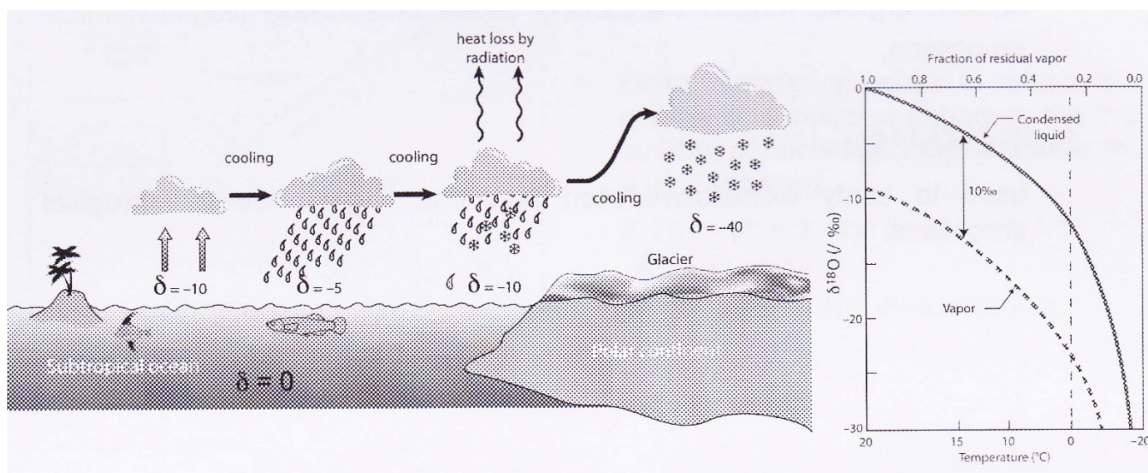
$\delta > 0 \rightarrow$ Provets isotopförhållande $>$ standardvärdets isotopförhållande

$\delta < 0 \rightarrow$ Provets isotopförhållande $<$ standardvärdets isotopförhållande

Syre- väteisotoper ($\delta^{18}\text{O}$, δD)

Syre är det tredje vanligaste grundämnet på jorden och har totalt sjutton kända isotoper, varav tre stabila (^{16}O , ^{17}O och ^{18}O). De samtliga radioaktiva isotoperna har en halveringstid på minde än 3 minuter. ^{16}O har den vanligaste förekomsten (99,762 %), följt av ^{18}O (0,2 %) (Hoefs, 1973) och det är förhållandet mellan de två sistnämnda som mäts. Väte däremot är det enklaste och vanligaste förekommande grundämnet och förekommer i form av fyra olika isotoper. Den vanligaste är ^1H (99,985 %), även kallat protium, har en kärna bestående av endast en proton. Den näst vanligaste isotopen är deuterium, ^2H , (0,015 %) som utöver protonen även har en neutron i kärnan. De övriga isotoperna, ^3H (tritium) och ^4H , är radioaktiva.

Då vatten befinner sig i jämvikt vid vätskefas och gasfas via evaporation så kommer förhållandet mellan ånga och vatten att vara densamma, medan isotopförhållandet i vardera fas kommer att skilja sig. Det finns sex olika kombinationer för H_2O molekyler: $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$, $^1\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ och $^2\text{H}_2^{18}\text{O}$, med respektive atommassa på 18, 19, 20, 20, 21 och 22. Vattenmolekyler övergår från flytande till gas när den tillförda energin är tillräckligt hög för att övervinna den elektrostatiske attraktionen som håller ihop molekylerna i den flytande fasen. Fysiken säger att den kinetiska energin är lika med halva massan gånger hastigheten. Lättare isotoper har högre hastighet än de tyngre och kommer därför lättare att övergå till gasform. Detta resulterar i att gas fasen blir anrikad av ^1H och ^{16}O , i förhållande till vätskefasen.



Figur 1 Fördelning av syre- väteisotoper i naturen

Då deuterium och ^{18}O är tyngre än ^{16}O och ^1H så kan de fixeras av organismerna i havet (så som foraminiferer) som sedan sedimenteras i havsbotten. Medan de lättare isotoperna evaporeras och transporteras via konvektionscellerna till polerna där de kan ackumuleras i isarna. Standardvärdet (δ) skiljer sig alltså som mest vid polerna. Både iskäror och foraminiferer är därför viktiga klimatarkiv.

Den internationella standardvärden för syre- väte isotoper som används kallas SMOW (Standard Mean Ocean Water) eller V-SMOW (Vienna standard mean ocean water) som är en homogen standard som tillhandahålls IAEA. Detta för att försäkra sig om att alla isotoplaboratorier har samma standardvärde.

Stabila isotopförhållanden för V-SMOW

Grundämne	Förhållande
Väte	$^2\text{H}/^1\text{H} = 155.76 \times 10^{-6}$
Syre	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2005.2 \times 10^{-6}$

Deltavärdet får vi i promille genom att sätta in värdena i formeln:

Syre:

$$\delta = ((\text{Förhållande}_{\text{prov}} - \text{förhållande}_{\text{standard}}) / \text{Förhållande}_{\text{standard}}) \times 1000$$

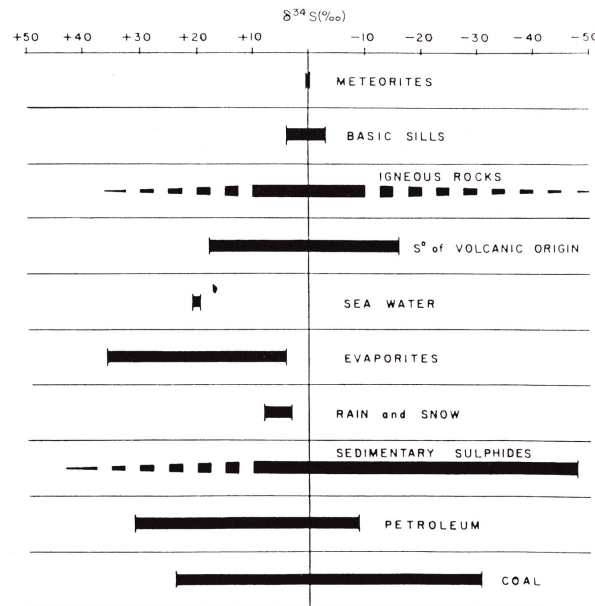
$$= ((\text{Förhållande}_{\text{prov}} - 0.0020052) / 0.0020052) \times 1000$$

Variationer i isotopförhållandena i grundvatten sker på grund av olika omsättningstider av vatten som i sin tur beror på årstidsvariationer. På vintern då det är kallare så blir isotopvärden mer negativa, medan det under sommaren blir högre. Detta är en ren temperatureffekt då vattenånga från havet får en annan sammansättning som beror på vattnets temperatur (Hoefs, 1973).

Svavel ($\delta^{34}\text{S}$)

Svavel är det 16:e vanligaste grundämnet i jordskorpan och förekommer som fyra stabila isotoper; ^{32}S (95,02%), ^{33}S (0,75%), ^{34}S (4,21%) samt ^{36}S (0,02%) (Hoefs, 1973). Då ^{32}S och ^{34}S är de med vanligast förekomst så är det deras förhållande som undersöks. En egenskap hos svavel som gör den intressant för geologi är att svavel förekommer i olika oxidationstillstånd, från den negativa laddningen hos sulfiden (2^-), det neutrala grundämnet svavel till positivt laddad i sulfat (6^+).

De största källorna för sulfat är havet, upplösning av evaporiter, oxidation av sulfidmineral samt från nederbörd. Svavel i nederbörd är den största anledningen till försurning, så källan till svavel i atmosfären har länge varit ett stort intresse. Varje källa till svavel har en karakteristisk sammansättning av $\delta^{34}\text{S}$ (Eby, 2003; Krouse and Grinenko, 1991). Man rapporterar kompositionen av svavel genom förhållandet $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ i promille (‰) i relation till standarden CDT (Canyon Diabolo Troilite), som har kvoten $1/22.22$ $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ mellan (Hoefs, 1973). Det är framförallt två processer som separerar de två isotoperna. Den ena är bakterier (då främst *Desulphovibrio desulphuricans*) som i en syrefattig miljö bryter ner sulfatet (SO_4) till svavelväte (H_2S), en process som kallas bakteriell sulfatreduktion. Då ^{32}S är den lättare isotopen så har bakterier lättare att bryta bindningar i sulfat som består av ^{32}S eftersom bindningar i molekyler med den 'tyngre' isotopen som bildar starkare bindningar och därför får vi då en anrikning av ^{32}S i svavelvätet och kvarvarande sulfat blir då anrikt på ^{34}S . Den andra vanliga separationen är diverse utbytesreaktioner där ^{34}S anrikas i den sammansättningen som har högsta oxidationstalet för svavel, alltså sulfat (också kopplat till bindningsstyrka).



Figur 2 Fördelning av svavel isotoper i naturen (Krouse och Grinenko, 1991)

Generellt kan man säga att evaporiter (sulfater) har högre värden på $\delta^{34}\text{S}$, medan sedimentära sulfider har lägre värden på $\delta^{34}\text{S}$ (Krouse och Grinenko, 1991). Grundvatten och sjöar har väldigt varierande värden på $\delta^{34}\text{S}$ då dessa beror på svavelkällan hos tillrinningsområdet. De flesta sötvatten har sulfationen som den andra eller tredje vanligaste anjon (efter HCO_3^-) (Hoefs, 1973) och är därför vanligtvis anrikade på ^{34}S (alltså högre $\delta^{34}\text{S}$ värden). $\delta^{34}\text{S}$ värdet i jordmåner varierar mellan -30 ‰ till +30 ‰, där grundvatten med negativa värden är ett resultat av organiskt material som bildats under syrefattiga förhållanden där bakteriell sulfatreduktion ägt rum. (Krouse och Grinenko, 1991).

Metaller

Metaller är det samlingsnamn för ämnen som befinner sig på det vänstra fältet i det periodiska systemet och som normalt agerar som katjoner i en lösning. Tungmetaller, som är av stor vikt för miljön, är definierade som de metallerna med atomnumret 20 eller mer. (Eby, 2003). I naturligt vatten kan många metaller vara i olika oxidationstillstånd vilket i sin tur påverkar dess mobilitet, löslighet, reaktionsförmåga, giftighetsgrad och biotillgänglighet (ett mått på hur mycket av en substans som når en organisms cirkulationssystem) (Björkvald, 2008).

En viktig grupp av metaller är spårämnen som är definierade som de ämnen som generellt förekommer i lägre koncentrationer än 1 mg/l i naturligt vatten (Drever, 1988). Dessa ämnen kommer från vittring av berg, eller via mänsklig aktivitet. Höga halter av metaller hittar vi i sulfider (som till exempel Cu, Zn, Mo, Pb, Cd och As) och då dessa är lättvittrade så kan man genom att analysera grundvatten hitta till exempel malm (Drever, 1988). Dessa spårämnen transporteras vanligen i sötvatten genom sorption på organiska molekyler (DOC) eller reaktiva mineraler, såsom ytan på lerpartiklar eller upplösta sedimentpartiklar (Björkvald, 2008). De flesta tungmetaller som förekommer som katjoner (de flesta spårämnen) binder starkt till ytor av oxyhydroxider, och då främst järn- och mangan(hydr)oxider (Stumm and Morgan, 1996). I vattenlösningar är oxyhydroxider

täckta med hydroxylgrupper (-OH), vilket betyder att ytan kommer påverkas starkt av vattnets pH (Stumm, 1987). För järn(hydr)oxider ökar absorptionsgraden från nära noll vid låga pH till nästan 100% vid högre pH (pH över 7,5). Adsorptionen för mangan(hydr)oxider är inte lika pH-känsliga och sorption förekommer även vid så låga pH-värden som 4 (Bäckström, 2009). Under syrefattiga förhållanden, när redoxreaktioner av Fe och Mn äger rum och hydroxider upplöses, frigörs metaller bundna vid adsorption.

Då metaller inte är bundna till små suspenderande partiklar så förekommer de i löst form, som fria hydratiserade joner. Genom vattnets polaritet kan metaller (som vanligen är katjoner) bilda svaga bindningar till det negativa syret i vattnet, och på så vis få ett 'skal' runt sig. Vissa metaller kan även bilda lösta komplex med andra ämnen i vattnet som vanligen förekommer som anjoner (till exempel hydroxid, karbonat, fluorid, sulfat och organiska syror). Metalljonen kallas för centraljon och den komplexbindande anjonen för ligand. Ligander kan vara i form av kolloider, som definieras som något som är mycket finfördelat (med storleken 1 nm till 1 µm), 'löst' i en annan substans och som inte kan sedimentera. De kan antingen vara organiska (DOC) eller oorganiska (oftast lermineral) och är negativt laddade och binder till positivt laddade katjoner, och då främst metaller. Om liganden består av DOC (löst organiskt kol) så minskar i regel toxiciteten, medan den ökar när hos den fria hydratiserade jonen (Berggren et al, 2006).

Järn (Fe) och mangan (Mn)

I jordskorpan är järn det fjärde vanligaste grundämnet, då jordskorpan innehåller ca 6 % järn. I jordens inre är järnhalterna betydligt högre, och på jorden som helhet är järn det vanligaste grundämnet, med uppskattningsvis ca 35 % av jordklotets totala massa (ne.se). De vanligaste källorna till järnet är magmatiska och metamorfa bergarter. Järn förekommer oftast i oxidationsformerna +2 och +3 i kemiska föreningar. Under oxiderande förhållanden blir det tvåvärda järnet omvandlat till trevärt järn (Stumm, 1987). Det trevärda järnet binder vanligen starkt till ligander, som till exempel -OH, i vanligt vatten till skillnad från det tvåvärda järnet (Stumm and Morgan, 1996).

Mangan är det tolfte vanligaste grundämnet i jordskorpan och förekommer vanligast i naturen som oxider, karbonater och silikater. Mangan urlakas från magmatiska och metamorfa bergarter och bildar sedan oxider och hydroxider. Vid syresatt vatten oxideras det tvåvärda manganet till det trevärda, vilket dock tar längre tid än vad oxidationen av det tvåvärda järnet. Det innebär också att Mn^{2+} är stabil i syrefattiga vatten som hydrerade joner. Det som också skiljer mangan från järn är att reduktion av denna kräver högre redoxpotential (Björkvald, 2008; Stumm och Morgan, 1996).

Arsenik

Arsenik är det tjugonde vanligaste grundämnet i jordskorpan, med en förekomst på nästan 2 mg/kg. Det är ett cancerframkallande ämne som är av stort intresse för miljön. Arsenik förekommer i både organiskt och oorganisk form. I vatten är det oorganisk arsenik som dominerar, och då som trevärt eller femvärt. I ett opåverkat grundvatten är den trevärda formen vanligast, men vid luftning av vattnet oxiderar trevärd arsenit till femvärd arsenat. Denna reaktion är långsam, varför det ofta kan förekomma både tre- och femvärd arsenik i samma vatten. Då grundvatten har höga koncentrationer av oxiderat järn förekommer ofta arsenit (As(III)) i förening med dessa. Denna form av arsenik är cirka 60 gånger mer toxisk än den femvärda (As(V)) (Socialstyrelsen, 2006).

Metallens bindning i mark

Metaller rör sig långsammare genom marken än vad vattnet gör. Detta beror på de kemiska mekanismerna adsorption och utfällning. Olika metaller har olika benägenhet att bindas i marken, och formen som metallen förekommer i beror av redoxförhållandet för marken (vilket även det påverkar metallens adsorption eller utfällningsbenägenhet). Utfällning sker när de ingående jonerna förekommer i tillräckligt höga koncentrationer i markvattnet. Som tidigare nämnts så påverkas utfällningen av fria metalljoner av andra ämnen i vattnet som kan bilda komplex (t ex DOC). När utfällning bildats och tillförseln av metallen upphör så kommer utfällningen att lösas upp. Det finns fyra viktiga grupper av utfällningar. Dessa är sulfider (som under syrefria, reducerande miljöer kan binda till As, Hg, Cu, Cd, Zn, Co och Ni), karbonater (som vid höga pH-värden binder till Cd, Zn och Cu), Oxider och hydroxider, samt sulfater och fosfater (om markvattnet innehåller höga sulfatkoncentrationer) (Berggren et al, 2006).

Adsorption innebär att metallen fastnar på en yta i marken, och då metallen lossnar kallas det desorption. Det finns olika mekanismer som styr detta, där den viktigaste för metaller är ytkomplexbildningar. Många katjoner bildar som tidigare nämnts gärna komplex med syret i hydroxylgrupper (OH) på exempelvis partikelytor eller trevärdigt järn och mangan, eller till DOC (COOH). Ytkomplexbildningar sker oftast om ytan är av motsatt laddning, men undantag finns. Ett exempel är när en arsenatjon (AsO_4) binder till två järnatomer. Adsorptionen av metaller är starkt beroende av pH eftersom partiklarnas laddning är pH-beroende. För till exempel anjonerna arsenat och sulfat är adsorptionen mest effektiv vid lågt pH, där arsenat binder mycket starkare till Fe än sulfatet (sulfatet transporteras alltså snabbare genom marken). För de katjoniska metallerna är det koppar och bly som bildar starka ytkomplex med oxidtytor vid högt pH. Humusämnena kan binda till metallkatjoner vid låga pH-värden och är därför viktiga i jordar. Vid högt pH-värde är humusämnena mindre effektiva vilket beror på ökad löslighet hos dessa som gör att metallerna tar de med sig ut i lösning. DOC koncentrationen i markvattnet är av stor vikt, då metallerna komplexbinds med det lösta organiska materialet (adsorptionen minskar). Adsorptionen är mest effektiv för anjoner vid lågt pH, och katjoner vid högt pH. (Berggren et al, 2006).

Redoxprocesser är också av stor vikt för metallers transport genom mark. Viktiga ämnen som ingår i redoxreaktioner är syre, kol, kväve, svavel, mangan och järn. Som tidigare nämnts så binds metaller till järn- och manganoxider, och likaså fälls dessa ut då järn och mangan reduceras (Berggren et al, 2006).

Vattnets transport genom mark

En stor del av metallerna är alltså bundna i marken och därför inte tillgänglig i grundvattnet, åtminstone inte kortsiktigt. De metaller som når grundvattnet har följt med ytvattnet genom marken till akvifären. Vattnets rörelse påverkas av gravitationen, variationen av vattenhalten, lufttryck, salthalt och porstorlekar i de olika markprofilerna. Att vattnet hålls kvar i marken trots gravitationen beror på attraktionskrafterna mellan den fasta fasen och vätskan. Den i sin tur beror på adhesion av vattenmolekyler till marpartiklarnas ytor (genom van der Waals bindning), samt osmotisk bindning av vatten i dubbelskiktet. Spridningen av metaller i vattnet påverkas av det biologiska systemet i marken (till exempel rötter), av varandra, samt av jordpartiklarna (till exempel adsorption). Då föroreningarna inte stannar upp utan följer med vattnets strömmar kallas det för advektion, och storleken på denna bestäms av koncentrationen av de lösta ämnena samt vattenflödet. Adsorption bromsar advektionen, och metallen rör sig då långsammare än vattnet (Berggren et al, 2006).

En annan process som påverkar vattnets strömning är diffusion. Det uppstår när en del av grundvattnet innehåller högre halter än en annan, och de tenderar då att utjämna varandra. Diffusion kan vara av stor vikt om strömningshastigheten är låg och går igenom täta lerlager (som i Rotebro). Även hydrodynamisk dispersion påverkar vattenflödet, eftersom vatten rör sig snabbare genom breda porer än trängre, och snabbare i centrum av varje por än längs porens väggar. Det innebär att inkommande lösningen i marken blandas med den ursprungliga. Detta sker inte när markvätskan inte är i rörelse (Berggren et al, 2006).

Geologi

Stockholmsåsen

Området som undersöks befinner sig på stockholmsåsen som är den rullstensås som sträcker sig från Arlanda söderut mot Västerhaninge. En rullstensås är i regel en smal och långsträckt isälvsavlagring som bildats i tunnlar under eller i kanaler ovanpå en inlandsis eller glaciär (Andreasson, 2006). Under den senaste istiden i nordvästra Europa, Weichselistiden (115 000 till 11 600 år sedan), var en tredjedel av kontinenterna täckta av is, där ibland Skandinavien, och dagens landformationer är ett resultat av denna. Glaciärer bildas i klimatområden där nederbörden i form av snö lagras från år till år. När snön så småningom omvandlas till en ismassa och når en tjocklek där trycket blir tillräckligt för att deformera iskristallerna och isen blir trögflytande och hamnar i rörelse på grund av dess egen tyngd. De största glacierna kallas inlandsisar och karakteriseras av dess kupolformade isdomer som täcker stora landområden. Från isens högsta parti rör sig iskanten vinkelrät ut (Andreasson, 2006). Isrörelsens riktning i Sverige har varierat. De tidigast avsatta isräfflorna har i östra Sverige haft en riktning från i stort sett norr till söder. De yngsta isräfflorna har däremot kommit från mer nord-nordost till söder i stockholmstrakterna. Under den senaste istiden, då dessa räfflor bildades, beräknas ismaktigheten ha nått en tjocklek på omkring 3000 meter (Eriksson, 1960). Då isen sakteligen började smälta av så bör maktigheten även ha varit betydande för att ha bildat en såpass stor rullstensås som Stockholmsåsen är. Avsmältningen bör även ha varit snabb då stora mängder vatten krävs för att dels transportera de stora materielmängderna samt att kunna hålla istunneln öppen.

Stockholmsåsen har en längd på nära 175 km och är avsatt på en småkuperad men mestadels flack berggrund. Höjdskillnaderna ser vi enbart söder om Mälaren, där Södertörn och södra Uppland karakteriseras av korsande dalgångar med sprickdalar och förkastningar (Eriksson, 1960). I norra Uppland är berggrunden betydligt flackare med mindre dalgångar då berggrunden här mestadels består av det prekambriska peneplanet. (Eriksson, 1960). Sprickorna och förkastningarna är vanligare söder om Mälaren då vi där har pegmatitsliriga och skiffrika gnejsområden, medan vi norrut har massiv granit (Eriksson, 1960). Dessa sprickor och förkastningar har i huvudsak tre riktningar, nordväst-sydöstlig, nordost-sydvästlig och en väst-östlig som resultat av rörelser som skedde i jordskorpan under bildningen av den kaledoniska bergskedjan som ägde rum under kambrium (www.nrm.se).

Den södra delen av åsen utgörs av två grenar, den ena västerut mot Ösmo och den andra öster ut mot Västerhaninge. De glaciärviala avlagringarna kring Ösmotrakten karakteriseras av finkornigt material med riklig förekomst av järn- och manganutfällningar. Den istunneln som avsatte åsens östra gren är ett resultat av avsmältningen av isen då detta blev dräneringsfåran som avlagrade

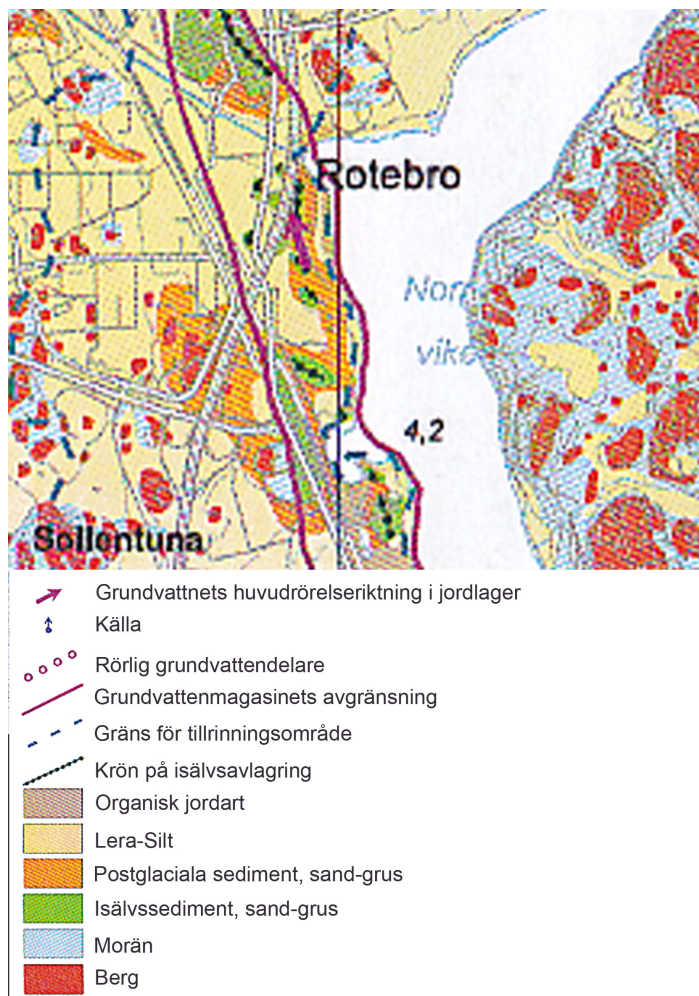
material till åsen. I området söder om Västerhaninge är avlagringen av glacifluvialt material nästan obetydlig.

Vidare rör sig åsryggen mot södra Enskede, upp till södermalm och från slussen genom stockholm med tydligt markerade kullar av 1-2 kilometers längd. Först vid Ulriksdal tunnar åsen ut och sträcker sig under Edsvikens yta, men återkommer som en mäktig rygg vid Helenelund. Åsryggarna längs Edsviken och Norrvikens västra sida är små och har i regel ojämn materialfördelningen, vilket förklaras av den sprickdal som sjöarna ligger i då isälvs materialet även sedimenterats i dessa.

Norra delen av åsen består av en mer sammanhängande ryggar då topografin är flackare och därför inte stört isälvarnas riktning och vi får även en bättre uppfattning om själva isrörelsens riktning. De isälvar som skapat rullstensåsen har i de flesta fall följt terrängens lägsta punkter, men vissa undantag har förekommit (bland annat vid Halmssjön).

Under järnvägsbron, utmed Norrvikens västra kant, består åsen av ett lerlager i nordvästlig riktning. Vid södra änden av bron är jordlagret inte lika sorterat utan består av svallsediment och grus. Medan längre norrut återfinns isälvsediment intill åskrön (SGU jordartskarta, 2009). Lerlagrets mäktighet vid bron varierar på mellan 10 meter till 1 meters djup (Hifab, 2012). Då det studerade området har mäktiga lerlager så blir tiden längre för ytvattnet att nå grundvattnet. Den hydrauliska konduktiviteten i lera i Rotebro har beräknats till 10^{-10} m/s, alltså en hastighet på 3mm/år.

Den underliggande berggrunden består vid järnvägsbron av en sur intrusivbergart med porfyritisk textur, så som granit (SGU berggrundskarta, 2009). Denna typ av urberg bildades under svekokarelska orogenesen då vulkanisk aktivitet ägde rum i Skandinavien. Berggrunden vid just Rotebro tillhör de yngre svekofenniska graniterna som bildades för mellan 1880-1740 miljoner år sedan. Då dessa graniter kristalliserat under ett sent skede av den svekokarelska deformationen är de i de flesta fall odeformerade och massformiga. (<http://www.earth.geo.su.se/geology/swedish6.html>)



Figur 3 SGUs jordartskarta

under leran mot Edssjön. Detta är möjligt då berget, som befinner sig på -15 meters djup, möter den grovkorninga moränen, och lertaget saknas eller är så tunt att grundvatten från underliggande friktionslager tränger igenom. Dessa lertäckta friktionslager, vars mäktighet minskar väster ut, är anledningen till Rotebros grundvattenmagasin. Här är även akviferen som störst, nämligen 400 meter bred och över 20 meter djup (Eriksson, 2009).

Ytvattensystem

På grund av att grundvattenytan i södra delen av magasinet ligger i nivå med Edsviken, och en hydraulisk kontakt råder mellan dessa, så finns risk för sjövattneträngning från Edsviken. Den tidigare vattentäkten vid Skansverket invid Edsviken har endast kunnat ta ut den mängd vatten som motsvarar det från landsidan tillrinnande grundvattnet för att undvika sjövattneträngning. Ytvattnet kring väster om åsen avleds via dagvattentunnel i berg vidare till Edsviken. Viss avrinning av grundvatten sker även till Edsviken (Eriksson, 2009).

Sjön Norrviken har ett stort tillrinningsområde på 94 km² och vattenkvaliteten har succesivt förbättrats sedan avloppsutsläppen stoppades 1969. Strax norr om Jästfabriken sker avrinning av sjön till en mindre bassäng i åsen. Grundvattenmagasinet längs Norrviken ligger i regel något lägre än sjönivån, därav sker ingen avrinning av grundvattnet. Istället får magasinet tillrinning från sjön. Tillrinningen varierar och beror på sjöns vattenstånd, det vill säga om sjöytan sjunker eller stiger.

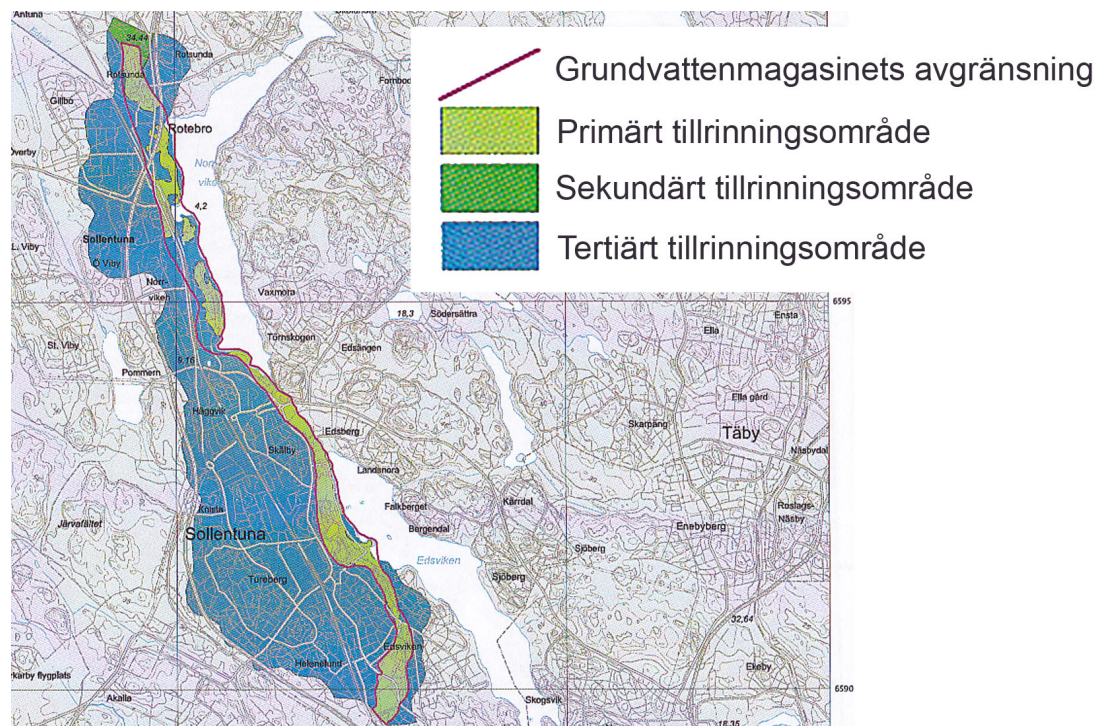
Hydrologi

Grundvattnet vid järnvägen i Rotebro är en del av Sollentunas grundvattenmagasin. Denna sträcker sig från en vattendelare vid Helenelund i söder, vidare norrut längs Edsvikens och Norrvikens västra sida ända till Edsån där en vattendelare av berg finns i åsen. Magasinets totala längd är 10 km och med en bredd på 100-300 meter. Akvifersmäktigheten ligger på mellan 10 och 20 meter och består av grovt isälvsmaterial med god genomsläpplighet. Delar av magasinet är täckt av ett ler-/siltlager, däribland Rotebro där bygget pågår. (enligt SGUs jordartsinformation)

På den södra delen av magasinet, längs Edsviken, ligger akvifären på 20 meters djup, men på grund av att grusåsen ligger direkt på berg så befinner sig magasinet i dränerat läge. Akvifersdjupet längs Norrviken varierar från 15 meter i söder till 25 meter vid Jästfabriken. Vid samhället Norrviken sker dränering/avrinning av grundvatten ner

Där Edsån rör sig ovanför grundvattenmagasinet, när den gör utlopp från Norrviken och rinner väster ut mot Edssjön, så kan tillrinning till ån ske vid höga grundvattennivåer. Likväl kan tillrinning från ån ske vid låg grundvattennivå (Eriksson, 2009).

Förutom den grundvattentillrinningen som sker från Norrviken så tillförs vatten även från direkt nederbördsinfiltration på åsen, samt från områdena vid sidan om grusåsen. Tillrinningsområdet delas



Södra delen av grundvattenmagasinet sträcker sig från bergvattendelaren i Helenelund till Norrviken i norr. Grundvattenmagasindelen vid Norrviken har större tillrinning än beräknad nederbörd på åsen och områdena väster om åsen, vilket förklaras genom infiltration från Norrvikens vatten. Konstgjord grundvattenbildning sker numera då Jästbolaget anordnat en pumpinstallation som pumpar sjövattnet till en infiltrationsbasäng uppe på åsen (Eriksson, 2009).

Tillrinningsområdet i söder vid Edsviken består till större delen av villabebyggelse, från Helenelund till Sollentunavallen. Längre norrut varierar bebyggelsen men förtätningar med hus sker främst väster om pendeltågsstationerna Helenelund, Sollentuna centrum, Häggvik, Norrviken och Rotebro.

Uttagningsmöjligheter och vattentäkter

Med uttagningsmöjlighet menas en grov uppskattning på hur mycket grundvatten som långsiktigt kan pumpas ut med en rimlig volym/tid med lämpligt placerade brunnkonstruktioner.

Om hänsyn endast tas till de primära och sekundära tillrinningsområdena så kan den naturliga grundvattenbildningen uppskattas till 14 l/s. Detta är ett minimivärde då tillrinning även sker från de tertiära tillrinningsområdena och från anslutande ytvattensystem (Eriksson, 2009).

I Rotebro utnyttjas grundvattnet av två aktörer, dels Rotsundavattentäkten, och dels Jästbolaget som har en vattentäkt som nu används för kyländamål.

Restervvattentäkten i Rotsunda består av tre grusfilterbrunnar med diameter 600 mm som är nedförda till nivåerna -12,3 m till -11,2 m, med markyta nivå på +6,3 och 6,3 m. Norrvatten har tillstånd att ta ut 26 000 m³ per dygn (300 l/s), dock högst 100 000 m³ per månad och högst 200 000 m³ per år (Eriksson, 2009).

Jästbolaget har 4 brunnar i grundvattenmagasinet. Tre av dessa är nerförda grusfilterbrunnar med en diameter på 300 mm, på nivåerna mellan 15-20 m i åsmaterial. Den fjärde är en formationsfilterbrunn med diametern 200 mm, nedförd 21 m. Då grundvattnet utnyttjats i kyländamål förs det till en värmepump för utvinning av värme till fjärrvärmenätet. Då Jästfabriken är i bruk så återanvänds det av värmepumpen nerkylda vattnet. Under helger, då fabriken står still, pumpas vattnet istället direkt ut till Norrviken. Jästfabriken har tillstånd att ta ut maximalt 9 200 m³ per dygn (106 l/s), samt att infiltrera 6 200 m³ (72 l/s) sjövattnet eller kylvattnet, dock inte mer än 3 000 (35 l/s) i den norra infiltrationsbasängen. Grundvattennivån får inte sjunka under +2,7. (Eriksson, 2009). Om detta sker ska Jästbolaget nyttja sin stödinfiltration med vatten från sjön Norrviken. Det här görs för att inte grundvattenytan ska sjunka för kraftigt om Norrvattens reservvattentäkt skulle behövas kopplas in.

Utöver vattentäkterna i Rotebro så finns ett förberett läge att bygga en ny grundvattenbrunn vid Norrvikens sydspets (där Djursholms vattentäkt tidigare låg) som är tänkt att fyllas vid krisläge då Norrvikens undervattningsledning landar här. Ett vattenverk, Skansverket, finns vid stranden av Edsviken. Dessa brunnar är tagna ur bruk men har behållits även de som reserv (Eriksson, 2009).

Ett kontorshus som är belägen mellan Edsviken och Norrviken, ovanpå ett tidigare grustag, pumpar upp grundvatten för komfortkyla. Vattnet återförs till åsen i en filterbrunn efter passerat genom en värmeväxlare, med ett flöde på 40 l/s (Eriksson, 2009).

Vid Edsviken norra ände har vi Edsbergs park som byggt en schaktbrunn som används för en konstgjord bäck som rinner genom parken, med ett flöde på mellan 5 till 10 l/s. Ur schaktet uttas även bevattning till parken (Eriksson, 2009).

I magasinets södra del, vid Edsviken, driver Sollentuna Energi ett akvifärslager där man under vintern lagrar kyllt vatten från Edsviken i grundvattenmagasinet. Under sommaren används kylan, genom värmeväxling mot fjärrkylnätet, till komfortkyla i bland annat Sollentuna Centrum. Då Edsviken har

tillräckligt kallt vatten, används värmeväxlaren direkt därifrån. Omkring 0,5 miljoner m³ av magasinet ändvänder i detta syfte (Eriksson, 2009).

Grundvattnets kemi och föroreningar

Norrvattens vattentäkt testpumpas varannan månad och då utförs även analyser av grundvattnet för kontrollera vattenkvaliteten. En gång om året görs en mer omfattande analys. Proverna har visat att grundvattnet är hårt, har en hög uranhalt samt tidvis smärre luktproblem. Vattnet som används i Jästbolaget har mycket bakterier och går inte att dricka. Detta kan bero på infiltrationen av sjövattnet. Vid strömning från söder mot norr har man uppmätt ökad halt av mangan och svavelväte, vilket antagligen beror på sulfatreduktion. Temperaturen i grundvattnet är jämn och låg, men ökar något där infiltration från Norrviken sker sommartid (Eriksson, 2009).

Provtagningar inom ramen för kontrollprogrammet har påvisat halter av natrium och klorid som överskrider motsvarande bakgrundsvärden. Dessa resultat kan förklaras av vägsalt, vilket styrks av att de högsta natrium och kloridhalter påträffats i det tertiära tillrinningsområdet (rör N11-04GW). I övrigt har höga halter av de flesta makroelement uppmätts i rören N11-04GW och N11-09GW, där även turbiditeten varit högre vilket också kan bidra till högre metallhalter (Hifab, 2012). Dessa två rör är belägna i utkanten av grundvattenmagasinet och inom det tertiära tillrinningsområdet. Grundvattenrören karakteriseras av dålig tillrinning och rören är belägna inom ett område med mer siltiga jordarter. Detta kan därför vara resultat av att grundvatten rört sig genom andra jordarter än isälvsmaterial och kan då också ha en längre uppehållstid. Vattnet kan även ha påverkats av omgivande vägar, järnväg och Rotebro centrum. Då omsättningstiden också är längre är det även vara svårt att få ett representativt prov.

Inom tillrinningsområdet har en del föroreningar skett. Ett bensinläckage skedde vid en gammal bensinstation vid Sollentunavägen norr om Helenelund. Sedan flera år tillbaka pågår där ett saneringsarbete. Markförorening i åsen har även påträffats vid hyreshus nära Helenelunds station från den tiden då SJ tidigare bedrev verksamhet. I övrigt finns hyreshusbebyggelse på åsen vid Helenelund och Rotsunda där uppvärmning sker med fjärrvärme. Norrortsleden korsar grusåsen, likaså E4an. Här finns grundvattenskydd utbyggt, vilket saknas vid järnvägen. En bensinstation finns på åsen, och så har vi den enda större industrin Jästfabriken (Eriksson, 2009).

Utförande

Provtagning av grundvatten

Under våren 2011 installerade NCC sex grundvattenrör, se figur 5 (N11-04 GW, 11-09 GW, N11-19 GW, N11-21 GW, N11-22 GW och N11-23 GW). Rören består av stål, och saknar ett innamäte av plast, och har en diameter på 5,08 cm. Sedan november 2011 utför Hifab provtagningar av grundvatten från de sex grundvattenrören. Provtagningarna sker inom ramen för ett kontrollprogram där ett antal parametrar analyseras för att kontrollera att brobyggnationen inte ger upphov till negativa förändringar i grundvattnets kvalitet jämfört med bakgrundshalter. Förutom bl.a. makroelement och näringsämnen analyseras även ett antal metaller och petroleumkolväten (fraktionerade alifater, aromater och BTEX). Grundvattenrören är inte optimala då kontaminering från stålet kan äga rum, samt att upptaget av grundvatten sker enbart från botten av rören.



Figur 5 Grundvattenrörens läge vid järnvägen i Rotebro



Figur 6 Provtagning av N11-23GW december månad



Figur 7 Provtagning av N11-23GW samt N11-19GW januari månad

För september, december och januari månad här även provtagning skett för att analysera syreväteisotoper, S-isotoper och metallhalter. Innan provtagning omsätts rören 3-5 gånger dess volym. Det första och sista som görs vid provtagning är att loda grundvattennivån. Rör N11-04 GW och N11-09 GW har dålig tillrinning och omsätts minst åtta timmar innan provtagning, och där rör N11-09 GW omsätts vid två tillfällen då rörets volym är så pass stor och tillrinning dålig. Till dessa rör används en s.k. Bailer (engångsprovtagare), till skillnad från de andra som har en installerad elpump. Rör N11-19 GW befinner sig inom byggområdet och i det röret finns inte en fast elpump installerad. Istället förs en separat elpump ner vid varje provtillfälle. För varje grundvattenrör tas ett prov för syre- väteisotoper i glasflaska, en liters prov för svavel i plastflaska, samt ett prov med filtererat och en ofilterat vatten i en plastburk för metallanalys. För det filtererade provet har ett 0,45 µm filter använts på plats. Utöver den sistnämnda analysen så noteras i fält även temperatur, pH och konduktivitet med hjälp av ett fältinstrument (Hanna Instruments H198130 Combo).

Provtagning Norrviken

Provtagning av Norrvikens vatten har skett 25 meter ut från strandlinjen och på ett djup av 20,2 centimeter från isens underkant. Isens totala tjocklek var 39,8 centimeter. Tre stycken provrör (4,0 ml Vacutainer utan tillsatts); A, B och C, har förts ner och fyllts med vatten från samma djup.

Bestämning av $\delta^{18}\text{O}$ och δD

Förberedelser

2 mg vatten från vardera prov mäts upp i glasvialer med skruvlock med hjälp av pipett (10 ml).

Analys

För analys av $\delta^{18}\text{O}$ och δD användes LGR's (Los Gatos Research) instrument Liquid Water Isotope Analyzer (LWIA). Den använder sig av inställnings bar, off-axis integrerad-hållrums laser spektroskopi. Den har även en mjukvara som identifierar och talar om kvantiteten av förorening (Spectral Contamination Identifier, SCI), den korrigerar alltså för det organiska materialet som kan förekomma i vattenproverna. Sammansättningen rapporteras i promille (‰) relativt till en given standard VSMOW (Vienna standard mean ocean water). Instrumentet har en precision på 0,8‰ eller minde för δD och 0,3‰ eller mindre för $\delta^{18}\text{O}$.

Bestämning av $\delta^{34}\text{S}$

Förberedelser

Utfällning



Figur 8 Vägning av vatten samt det utfällda bariumsulfatet

Det behövs en viss mängd för att bestämma isotopsammansättningen av svavel. Om koncentrationen är för låg behöver svavel anrikas genom jonbyte och utfällning. Förberedelser för S-isotoper krävs för att fälla ut SO_4^{2-} från lösningen. Målet är att få en fällning om minst 10 mg BaSO_4 . Till en början

behöver man därför räkna ut vattenvolymen som behöver jonbytas för varje prov för att framställa 10 mg BaSO₄. För att bariumsulfat ska fällas ut så tillsätts BaCl till lösningen och då sker jonbyte mellan anjonerna Cl₂²⁻ och SO₄²⁻. BaSO₄ fälls ut eftersom denna inte är vattenlöslig.

Molvikter

Grundämne	
Ba	137,34
S	32,064
4 O	63,9976
SO₄	96,0616
BaSO₄	233,4016

$$\frac{96,0616 \text{ mg SO}_4}{X \text{ mg SO}_4} = \frac{233,4016 \text{ mg BaSO}_4}{10 \text{ mg BaSO}_4} \rightarrow X = \frac{96,0616 \times 10}{233,4016} = 4,11 \approx 4$$

För 10 mg BaSO₄ behövs alltså 4 mg SO₄. Då analyser gjorts så är sulfathalterna (mg/l) redan kända för proverna (se tabell 1 i Appendix).

$$\frac{\text{Provpunktens sulfathalt} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)}{4} = \frac{1000}{x} \rightarrow X = \frac{4 \times 1000}{\text{Provpunktens sulfathalt} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)}$$

De vattenprover som har en volym på under 100 ml efter eluering fylls på med destillerat vatten till just 100 ml, varefter proverna surgörs med 1 ml 3M HCL. Eluatet placeras sedan på en värmeplatta där de värms upp och får koka i ungefär en minut. Detta för att få bort karbonat från systemet. Därefter tillsätts 10 ml 0.25M BaCl i eluatet, och de placeras i vattenbad som håller temperaturen 90°C i två timmar för att fälla ut bariumsulfatet.

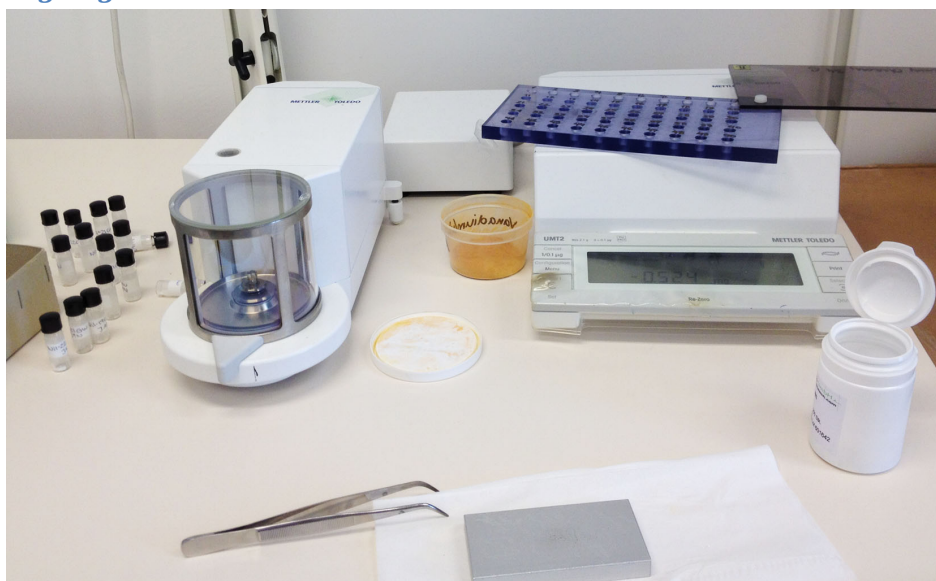
Filtrering

Efter två timmar placeras bägarna med lock på för att svalna i cirka ett dygn, då man kan påbörja filtreringen. 0,45µm membranfiltret läggs på filterhållaren, som är kopplad till en vakuumpump. När pumpen är påslagen hålls lösningen med BaSO₄ i och vattnet separeras och sugas ner i behållaren. När allt är filtrerat läggs filtret med bariumsulfat i en plastbehållare som placeras för torkning i 24 timmar för att sedan skrapas av och förvaras i glasburkar.

Skrapning

Till en början vägs utfällningen tillsammans med filtret och då ett medelvärde på filtrets vikt har gjorts (4,2 mg) går det att beräkna den totala bariumsulfathalten. Då sulfathalten i provet är känt så har en jämförelse med hur mycket som fällts ut gjorts. På så vis går det att se att märkningen av burkarna är korrekta. Fällningen skrapas försiktigt av på ett vågpapper med hjälp av en skalpell och pincett, och det är viktigt att så mycket som möjligt följer med. Därefter förs fällningen av bariumsulfat i en glasvial som förses med ett lock.

Vägning



Figur 9 Invägning av 0,5 mg bariumsulfat samt 0,5 mg vanadiumoxid

0,4-0,6 mg bariumsulfat från vardera prov vägs in i en tennkapsel tillsammans med 0,5 mg vanadiumoxid (V_2O_5).

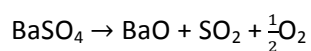


Figur 10 Substanserna i dess behållare.

Tennkapseln försluts ordentligt och placeras i dess fack.

Analys

För att genomföra analysen krävs en lämplig gas sammansättning av ämnet som kan införas till masspektrometern. För svavel används vanligen svaveldioxid (SO_2) och så även i detta fall. För att få ut svaveldioxiden ur bariumsulfatet krävs reaktionen



För att uppnå detta blandas bariumsulfatet med vanadinpentoxiden tillsammans i en tennkapsel som sedan förs ned i en kvarts tub med en viss packning. Tenn används för att fånga upp det fria syret så att inte SO_3 bildas i stället, då denna förändrar värdet på $\delta^{34}S$ från ursprungsvärdet. Vanadiumoxidet är en katalysator som är tillsatt för att inte behöva så höga temperaturer (Krouse. H.R, Grinenko, 1991)

Provet analyserades genom förbränning med en NC 2500 elementar analysator från Carlo Erba (NC2500) som är kopplad till en masspektrometer Delta plus från Thermoscientific (en så kallad IRMS, Isotope Ratio Mass Spectrometry). Elementaranalysatorn har en oxidation-reduktion reaktor packad med kvartsull, WO_3 , CuO och Cu och har en temperatur på 1020°C. Prover förbränns i en puls av syre och förbränningsgaser leds genom systemet med helium med en flödeshastighet av 80ml/min. Efter reaktorn förs förbränningsgasen genom en vattenfälla med magnesiumperklorat och en GC-kolonn där gaser separeras vid 100°C. Sammansättningen rapporteras som $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ i promille (‰) relativt till en given standard CDT (Canyon Diabolo Troilite).

Bestämning av metaller

För att få en tydlig bild av vattnets sammansättning så analyseras metallhalterna med hjälp av ICP-OES. Från varje grundvattenrör har vid vardera provtillfället tagits prover för ofiltrerat och filtrerat vatten. Det filtrerade vattnet har passerat ett 0,45 µm filter.

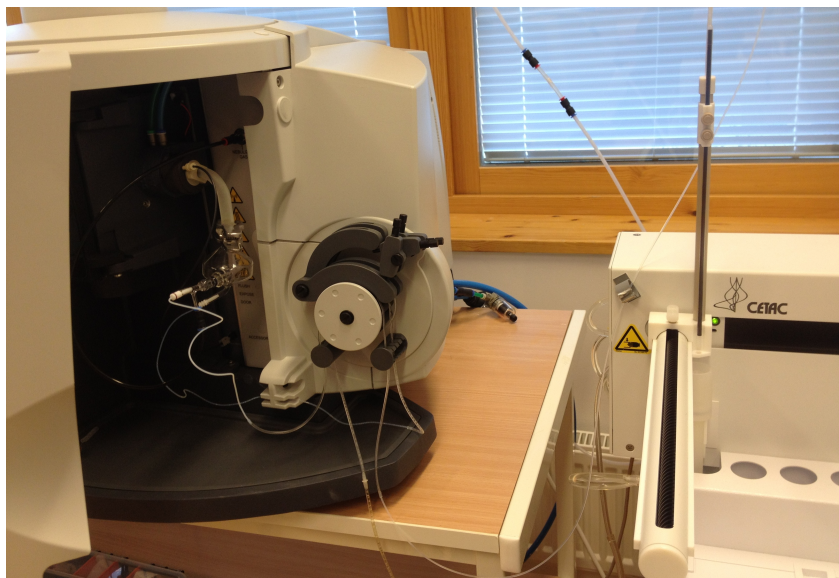
Metallerna som analyserats är Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Sr, Ti, V, Zn och Zr.

Förberedelser

Cirka 10 ml av vardera prov från både de filtrerade och ofiltrerade hälls upp i var sitt provrör av plast.

Analys

Ungefär två milliliter vattenlösning från vardera prov pumpas upp i instrumentet Thermo ICAP 6500, som är en ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy). Vattnet finfördelas med en så kallad, och förs sedan in i en plasma bestående av argon som har en temperatur på ca 10 000 K (ICP).



Figur 11 Instrumentet ICP-OES

Vid dessa höga temperaturer så uppstår kollisioner mellan argonet och de laddade partiklarna, som i sin tur leder till att atomerna exciteras. När atomerna är i det exciterade stadiet så kan de gå tillbaka till lägre energi. Energin frigörs i form av ljus och i en OES mäts intensiteten för ljus vid en viss våglängd, för att förklara koncentrationen för ämnet i fråga. När elektronen hoppar mellan orbitaler och excitation sker för olika ämnen så blir det olika ljus. Generellt kan man säga att ju längre ifrån kärnan orbitalen är, desto högre energinivå. Ljuset från de exciterade atomerna och jonerna har då

flera olika våglängder och för att skilja på dessa och mäta en i taget utan inblandning från de andra så används en monochromator eller polychromator (som kan mäta flera våglängder samtidigt) som separerar dessa. Innan prover analyseras körs ett kontrollprov, en så kallad certifierad standard NIST 1643e, för att kontrollera akalibreringen. Därefter körs kontrollprovet efter var 15e prov. Baserat på kontrollprovet är analysen bättre än +/-5%.

Resultat och diskussion

Fältmätningar

3-4 december 2012	N11-04 GW	N11-09 GW	N11-19 GW	N11-21 GW	N11-22 GW	N11-23 GW
Temperatur (°C)	9,6	5,6	12,5	9,1	9,9	7,42
Konduktivitet mS/m	137	93	58	118	104	54
pH	7,68	7,71	7,63	6,47	6,85	7,42
30-31 januari 2013	N11-04 GW	N11-09 GW	N11-19 GW	N11-21 GW	N11-22 GW	N11-23 GW
Temperatur (°C)	8	7,2	11,8	8,8	10,1	3,7
Konduktivitet mS/m	142	104	72	116	113	56
pH	7,56	7,52	7,61	6,65	7,02	7,66

Figur 12 Resultat för temperatur, konduktivitet och pH för provtagningar i december och januari.

Rör N11-19 GW och N11-23 har god tillrinning och visar båda på låg konduktivitet. Då konduktiviteten är ett mått på lösningens totala joninnehåll betyder det att lösningar med låg konduktivitet inte har infiltrerat mark speciellt långt eller en svårvittrad mark. Vattnet från dessa grundvattenrör kan därför ha passerat marken direkt från sjön, som generellt har lägre konduktivitet än det grundvatten som har passerat genom åsen. Detta styrks även för rör N11-23GW som har betydligt lägre temperatur, framförallt för januari månad, då även Norrviken har liknande temperaturer. Vatten i Norrviken har under isen en temperatur som ligger nära temperaturen hos rör N11-23GW.

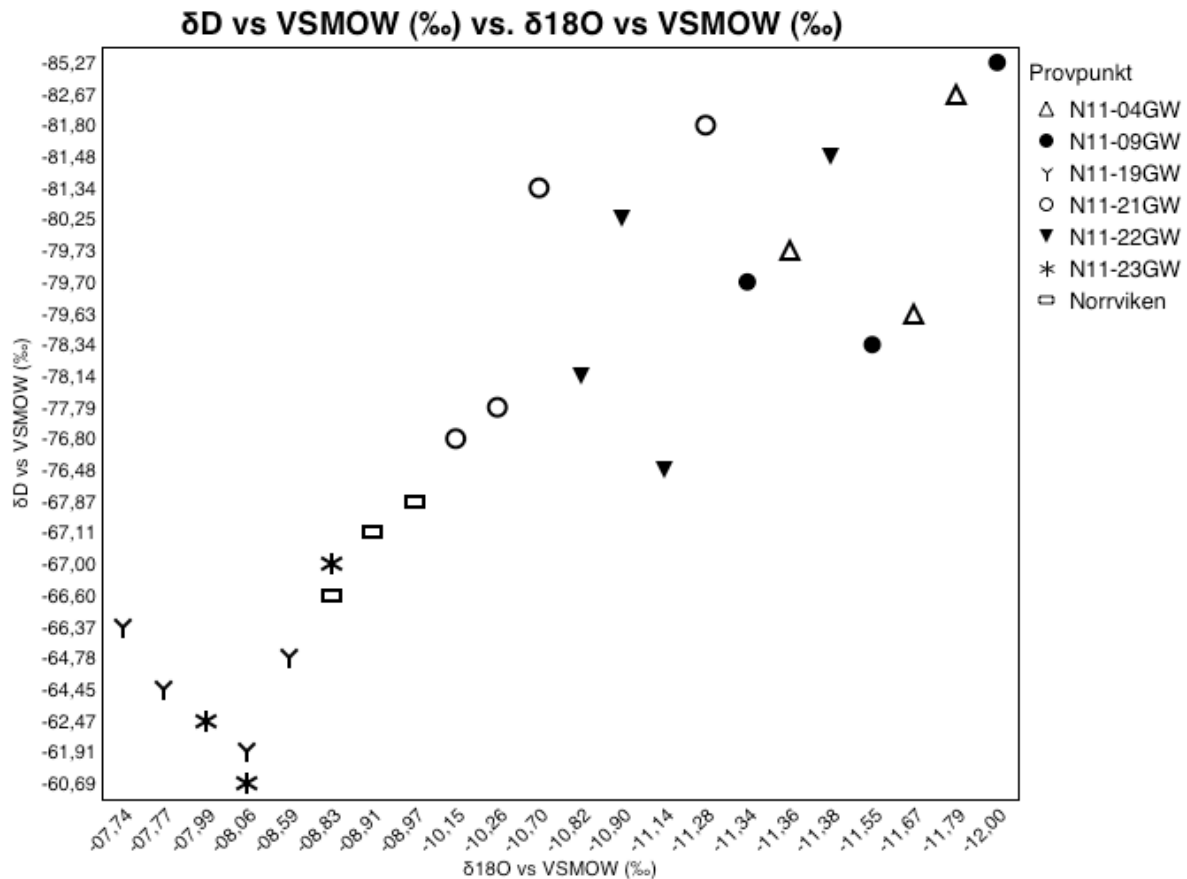
Provpunkt N11-04GW och N11-09GW har dåligt tillrinning och måste omsättas vid två tillfällen och då med en bailer. De har även hög turbiditet och efter upptag av ett par liter följer siltpartiklar med vid provtagning. Siltpartiklarna kan ha påverkat provens pH-värden och försurat denna. För rör N11-09GW syns partiklar redan efter ungefär en liter under provtagning. Vattnet från detta rör luktar metaller och sump. Hög ammoniumkvävehalt har påvisats vid provtagningar inom kontrollprogrammet, vilket antyder på reduktion i systemet.

N11-21GW, som är placerad vid Jästbolaget, har vanligtvis god tillrinning men vid provtagningen under januari månad avtog tillrinningen under provtagning. Omsättningen blev inte optimal och den försämrade tillrinningen berodde troligtvis på elpumpen. De första litrarna var mörkgråa och grumliga vilket troligtvis beror på utfällningar av metall från grundvattenröret. Vattnet luktade metalliskt.

Vid provpunkt N11-22GW förekom det svarta och bruna utfällningar vid provtagningarna, vilket tyder på utfällning av trevärt järn och mangan (oxider av Fe och Mn). Utfällningar av dessa sker i syrerika miljöer för när syrgas är löst i vatten oxiderar det tvåvärda järnet till trevärt (blir $\text{Fe}(\text{OH})_3$) och manganet till trevärt/fyrvärt (blir MnO_2 eller till exempel $\text{MnO}(\text{OH})$). Eftersom dessa inte

sedimenterats utan fortfarande är i lösning kan detta bero på att organiska syror är i systemet (Grip och Rodhe, 1983). Runt om kring grundvattenröret finns en gräsmatta, som kan ha gödslats. Brännässlor växer här under sommartid vilket indikerar höga kvävehalter.

δD , $\delta^{18}O$ vs. V-SMOW



Figur 13 $\delta^{18}O$ vs. δD , båda i ‰ vs. V-SMOW, för samtliga provtagningar.

Proven från Norrviken är tagna nära isens underkant och kan därför påverkas av denna. Eftersom nederbörd har högre värde på δD , $\delta^{18}O$ så borde det egentliga värdet för Norrvikens vatten ligga på närmare -7 till -8 för $\delta^{18}O$, medan δD också bör ha ett något mindre negativt värde. Norrvikens vatten skulle alltså plotta närmare värdena för N11-19GW och N11-23GW.

Resultaten visar att rör N11-19GW och N11-23GW liknar Norrvikens vatten, därför kan vi med säkerhet säga att dessa rörs grundvatten kommer från infiltration av sjövattnet. För september månad liknar isotopförhållandena för Norrviken även grundvattenrör N11-21GW som också ligger närmast Norrviken, samt intill jästfabriken. Detsamma gäller för provpunkt N11-22GW som också plottar närmare Norrvikens vatten för september månad.

Infiltrationen beror troligtvis på vattenståndet i sjön. Då grundvatten befinner sig på lägre nivå än Norrviken så sker avrinning från denna till grundvattnet. Hur mycket avrinning som sker beror på hur högt vattenståndet är i sjön, och det är i regel högre på hösten än vintern. Detta förklarar varför rör N11-21GW och N11-22GW under september plottar närmare Norrviken då dessa troligtvis också påverkades under avrinningen som ägde rum på hösten. Infiltration kan även förekomma på grund av att jästbolaget nyttjar grundvattnet vilket kan ändra strömningen av grundvatten.

För resterande månader visar rör N11-21GW och N11-22GW, samt alla provtagningar från N11-04GW och N11-09GW, på lättare vatten, det vill säga lägre isotopvärden, än Norrviken och har troligtvis en mer representativ sammansättning från nederbörden under året.

$\delta^{34}\text{S}$ vs. CDT (‰)

$\delta^{34}\text{S}$ vs CDT	N11-04GW	N11-09GW	N11-19GW	N11-21GW	N11-22GW	N11-23GW
Sept.	X	X	-0,35	-0,79	-0,41	-0,71
Dec.	1,75	-1,23	-0,56	-1,01	-0,81	-0,45
Jan.	1,9	-0,67	-0,87	-1,05	-0,1	-0,03

Figur 14 Värderna för $\delta^{34}\text{S}$ vs. CDT i ‰ för samtliga provtagningar

Resultaten visar att grundvattnets $\delta^{34}\text{S}$ värde är lägre än 0 (förutom rör N11-04GW), vilket innebär att källan för svavel troligen är sulfider. Isotopvärdena tyder inte på att reduktion pågår just nu eftersom det hade lett till en anrikning av isotopvärdet i sulfat, det vill säga högre värden. Grundvattnet består alltså till större delen av svavel från sulfider som anrikats på ^{32}S genom bakteriell sulfatreduktion eller sulfider som finns i marken från berggrunden. Värderna kring 0 är vanliga för så kallade magmatiskt svavel (Krouse and Grinenko, 1991). Kring Rotebro är det mest troliga att sulfiderna kommer från sedimentära bergarter, kanske från sediment då området var täckt av hav. Grundvattnet representerar inte svavel från nederbörd, då denna tenderar att ligga mellan +3 till +7‰ (Björkvald et al, 2008). För att bakteriell sulfatreduktion skall kunna pågå krävs en kolkälla, vanligen organiskt material (DOC/TOC). Det finns andra studier som påvisar förekomst av svavelväte (H_2S) varför sulfiderna troligen är bildade genom bakteriell sulfatreduktion (Eriksson, 2009). Troligen är detta årstidsbundet så att reduktion förekommer mest under den varma delen av året och upplösning av sulfider sker sedan under den kalla delen (Andersson, 1990).

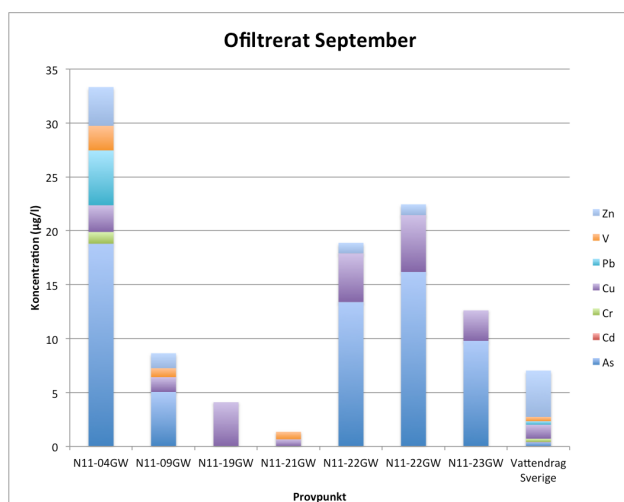
Isotopförhållandena varierar från +1,9 ‰ i rör N11-04GW till -1,23 ‰ i rör N11-09GW. Även rör N11-21GW visar på lite högre negativa värden och varierar mellan -0,79 ‰ till -1,05 ‰. Rör N11-04GW, som har positiva värden, är anrikade på ^{34}S och har även påvisat högre halter av sulfat. Detta tyder på en annan svavelkälla för detta rör och det kan vara så att sulfider finns på olika nivåer i marken.

Metaller

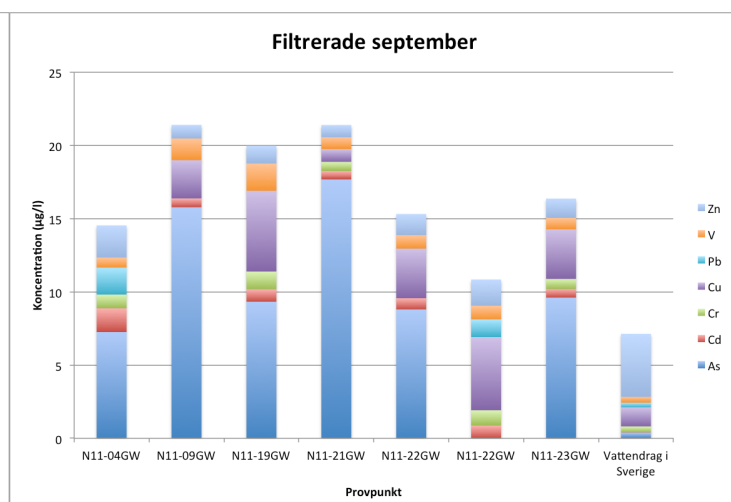
Fullständig analys av metaller för grundvattenrören redovisas i tabell 4 samt 5. Resultaten anges i ppb ($\mu\text{g/l}$).

Spårämnen

Spårämnena arsenik, kadmium, krom, koppar, bly, vanadin samt zink har påträffats i grundvattenrören. Halterna är jämförda i tabellerna nedan med de naturliga, ursprungliga halterna i vatten som är uppskattade utifrån nuvarande provtagningar i södra Sverige, enligt naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2008). Då de ofiltrerade proverna innehåller mer kolloider och DOC, som inte filtrerats bort, så förväntas metallhalterna hos dessa vara betydligt högre. Metaller är i regel katjoner som binder till de negativa hydroxiderna som täcker ytorna på kolloiderna. Arsenik är som tidigare nämnts en anjon, men denna metall binder till det oxiderade järnet i vattnet.



Figur 15 Koncentration av spårämnen i grundvattenrör för ofiltrerade prover i september.



Figur 16 Koncentration av spårämnen i grundvattenrör för filtrerade prover i september.

N11-04GW

I det ofiltrerade vattnet förekommer förhöjda halter av arsenik, krom, koppar, bly, vanadin och zink, jämfört med koncentrationer i vattendrag. I det filtrerade vattnet har samtliga halter reducerats, och koncentrationen av var lägre än detektionsgränsen. Däremot har kadmium påvisats.

N11-09GW

Det filtrerade provet visar på arsenik, koppar, vanadin och zink. Det filtrerade har betydligt högre halt arsenik, koppar, vanadin och samma halt av zink samt kadmium. Det filtrerade vattnet har troligtvis förväxlats med det ofiltrerade.

N11-19GW

Det ofiltrerade vattnet innehåller bara koppar, och har troligtvis förväxlats med de ofiltrerade vattnet som innehåller mer koppar, mycket arsenik, kadmium, krom, vanadin och zink.

N11-21GW

Ofiltrerat innehåller vanadin och koppar, medan det ofiltrerade har förhöjda halter arsenik, samt zink krom och kadmium utöver vanadin och koppar. Dessa prover har troligtvis också förväxlats.

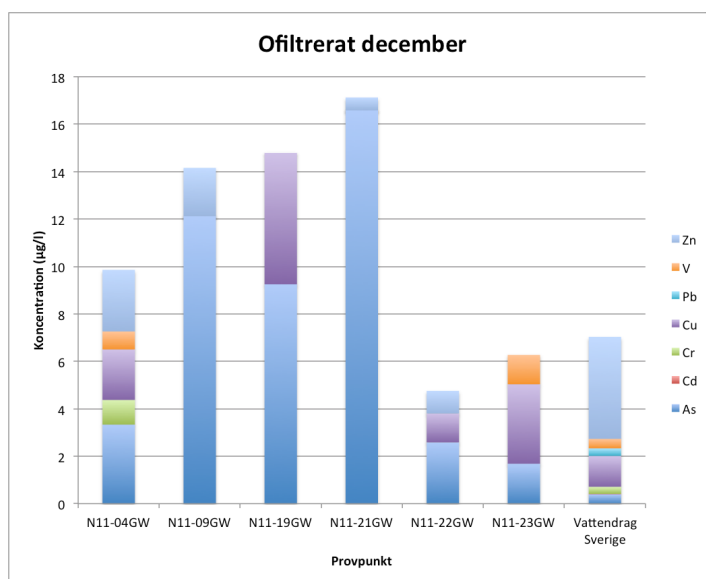
N11-22GW

Omprovtagning av detta grundvattenrör har gjorts. Båda ofiltrerade proverna har liknande halter av arsenik, koppar och zink. De filtrerade prover skiljer sig dock åt. Det ena provet har utöver arsenik, koppar och zink även vanadin och kadmium. Det andra provet har ingen arsenik men krom, kadmium, bly och högre halt koppar.

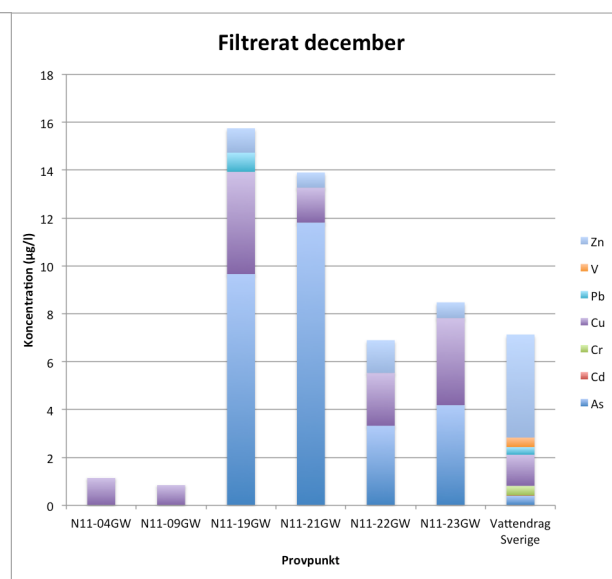
N11-23GW

Det ofiltrerade vattnet har arsenik och koppar. Filtrerade provet har liknande halt arsenik och koppar, men även kadmium, vanadin, zink och krom. Dessa prover har troligtvis också förväxlats.

December



Figur 17 Koncentration av spårämnen i grundvattenrören för ofiltrerade prover i december.



Figur 18 Koncentration av spårämnen i grundvattenrören för filtrerade prover i december.

N11-04GW

I det ofiltrerade vattnet förekommer förhöjda halter av arsenik, krom, koppar, vanadin och zink. I det filtrerade provet påvisas enbart koppar, vars halter har halverats.

N11-09GW

I det ofiltrerade vattnet förekommer arsenik och zink i förhöjda halter. I det filtrerade provet detekterades varken arsenik eller zink, däremot påvisades koppar.

N11-19GW

Förhöjda koncentrationer av arsenik och koppar, mer koppar än i något av de övriga rören. När vattnet filtrerats minskar koppars något, men istället har vi även koncentrationer av bly och zink.

N11-21GW

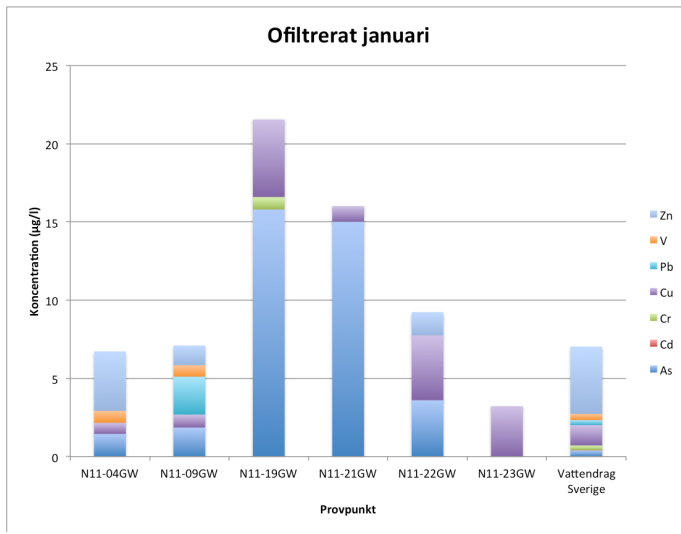
I detta grundvatten rör har de högsta koncentrationerna av arsenik uppmätts, annars förekommer även zink. När provet filtrerats minskar arsenikhalten, men zinken är opåverkad, och koppar tillkommer.

N11-22GW

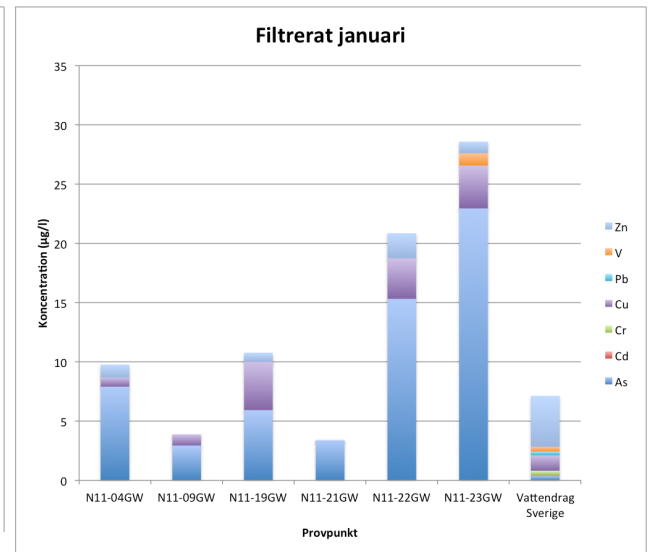
Grundvattenröret har lägre halter av arsenik, koppar och zink. Det filtrerade provet visar samma metaller men ökade halter. Dessa två kan därför ha förväxlats.

N11-23GW

Det ofiltrerade vattnet har arsenik och förhöjda halter koppar och vanadin. Det filtrerade provet visar förhöjda halter arsenik, opåverkade koppar och vanadin utbytt mot zink.



Figur 19 Koncentration av spårämnen i grundvattenrören för ofiltrerade prover i januari.



Figur 20 Koncentration av spårämnen i grundvattenrören för filtrerade prover i januari.

N11-04GW

Vanadin inte kvar i det filtrerade provet och zinkhalten har minskat, medan arseniken ökat. Kopparn är oförändrad.

N11-09GW

Bly, vanadin och detekterades inte i det filtrerade provet. Kopparn och arseniken opåverkad.

N11-19GW

Arsenik har minskat i det filtrerade och kromen är borta. Däremot har zink tillkommit.

N11-21GW

Arsenik har minskat betydligt och kopparn är borta.

N11-22GW

Kopparhalten minskat i det filtrerade vattnet medan arsenik ökat. Zink opåverkad.

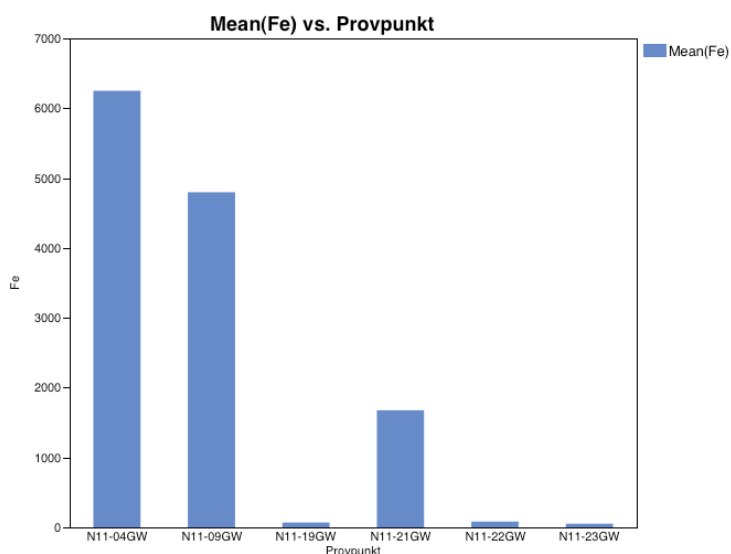
N11-23GW

Ofiltrerade vattnet visar att enbart koppar finns, medan det filtrerade har hög koncentration av arsenik samt zink och vanadin. Proverna har troligtvis förväxlat.

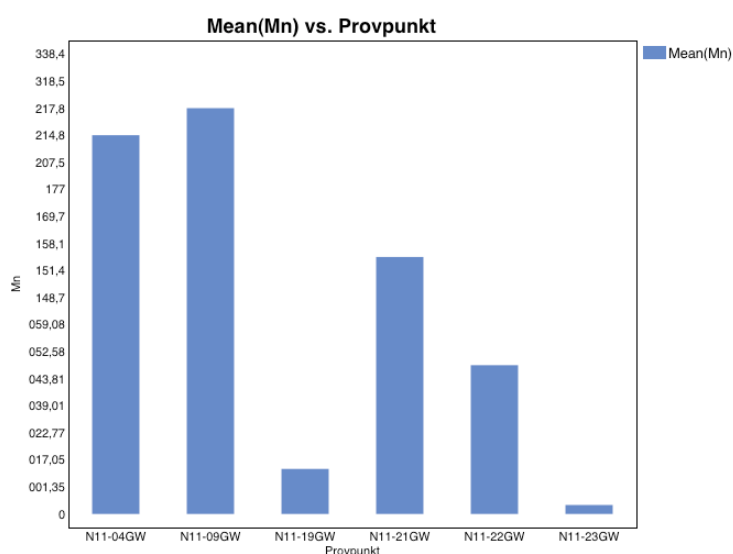
Mangan och järn

Höga halter av järn är uppmätta i området och ovanligt mycket mangan.

Ofiltrerade vattenprover



Figur 21 Medelvärde för järn i grundvattenrör för ofiltrerade prover.

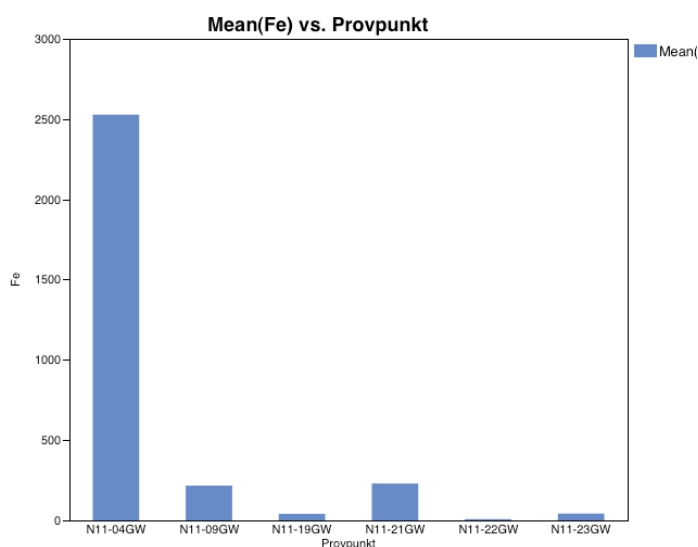


Figur 22 Medelvärde för järn i grundvattenrör för filtrerade prover.

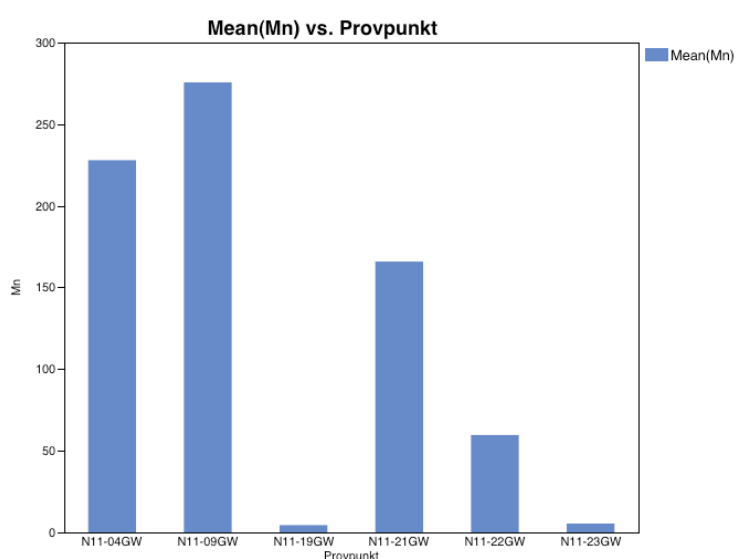
Järnhalterna är höga i främst rör N11-04GW och N11-09GW, men även i N11-21GW. Mangankoncentrationerna är väldigt höga för N11-04GW och N11-09GW, samt N11-21GW och N11-22GW.

Prov N11-23 och N11-19GW har låga halter av mangan och järn, och i generellt även lägre koncentration av spårämnen. Rör N11-04GW är det rör som har högst halter av spårämnen, strax efter N11-09GW, och dessa påverkas även i störst utsträckning av filtreringen. Dessa två rör har även de högsta koncentrationerna av mangan och järn. Arsenik och koppar är de metaller som inte påverkas av filtreringen. Rör N11-19GW har högst koncentration arsenik, men väldigt låga halter av mangan och järn.

Filtrerade vattenprover



Figur 23 Medelvärde för mangan i grundvattenrör för ofiltrerade prover.



Figur 24 medelvärde för mangan i grundvattenrör för filtrerade prover.

Mangan är stort sett opåverkad av filtreringen, medan järnet däremot minskar med närmare 70 % i de filtrerade proven och som tydligast hos rör N11-04GW och N11-09GW. Dessa rör består till största delen av det trevärda järnet som fällts ut.

Dricksvattenkvalitet

Det undersökta området är som tidigare nämnts en del av Stockholms reservvattentäckt. Enligt livsmedelsverket gäller samma krav för dessa som för ordinarie vattentäckt, då reservvattentäckten tas i bruk om denna skulle slås ut. För dricksvatten så har livsmedelsverket tagit fram gränsvärden för vad som är otjänligt, eller tjänligt men med anmärkning.

Aluminium (Al)

Höga halter av aluminium har uppmätts i grundvattenrör N11-04GW och N11-09GW för ofiltrerade prover under samtliga provtillfällen. De överskrider vad livsmedelsverket anser är tjänligt men med anmärkning (0,100 mg/l). Höga halter kan orsaka slambildning (Livsmedelsverket, 2006). Förekomsten är troligtvis naturlig men kan också ha påverkats av kontaminering från stålrören, speciellt för rör N11-04GW och N11-09GW som har dålig tillrinning och det är svårt att omsätta dessa.

Arsenik (As)

I grundvattenrören förekommer förhöjda halter av Arsenik vid flera provtillfällen, både ofiltrerade och filtrerade. Ibland nästan som det dubbla värdet för vad som anses som otjänligt (10µg/l). Höga halter av arsenik är giftigt och ökar risken för cancer (Livsmedelsverket, 2006). Arsenikförekomsten är troligen naturlig.

Järn (Fe)

De flesta grundvattenrör, förutom N11-19GW och N11-23GW som är sjövattnet, innehåller järnhalter som anses tjänligt men med anmärkning (0,100 mg/l). Höga halter av järn bidrar till utfällningar som i sin tur leder till missfärgningar och ger smak (Livsmedelsverket, 2006). Järnet kan vara naturligt, men en del av halterna kan komma från kontaminering av stålrören som är nerförda i grundvattnet och används vid provtagning.

Kalcium (Ca)

Höga halter av kalcium har uppmätts i rör N11-21GW och N11-22GW för samtliga prover, men ligger nära för de övriga rören också. Gränsvärdet för tjänligt men med anmärkning är 100 mg/l. De är troligen naturligt förekommande i grundvattnet, och de bildar utfällningar (Livsmedelsverket, 2006).

Mangan (Mn)

Samtliga prover innehåller höga halter av mangan som är tjänligt men med anmärkning (0,050 mg/l), förutom rör N11-19GW och N11-23 GW som är sjövattnet. Höga halter mangan ger utfällningar, som när de lossnar färgar vattnet svart och bidrar till missfärgning (Livsmedelsverket, 2006).

Natrium (Na)

Grundvattenrör N11-04GW innehåller som tidigare nämnts mycket natrium, nästan dubbelt så mycket emot vad som anses tjänligt men med anmärkning (100 mg/l) (Livsmedelsverket, 2006). Grundvattnet i detta rör påverkas av vägsalt.

Sulfat(SO₄)

Grundvattenrör N11-04GW innehåller högre halter av vad som anses tjänligt men med anmärkning (100 mg/l). Höga halter av sulfat är troligtvis naturliga, men högre halter än gränsvärdet påskyndar korrosionsangrepp (Livsmedelsverket, 2006).

Turbiditet

Samtliga prover visar på högre turbiditet än vad som anses tjänligt men med anmärkning (0,5 FNU), där rör N11-04GW och N11-09GW visar på de högsta värdena (omkring 100 FNU). Turbiditeten kan utgöras av organiskt och oorganiskt material och kan innebära ökad risk för vattenburen smitta och mikrobiologisk tillväxt. Rör N11-19 GW, N11-22GW och N11-23GW visar på lägre värden.

Sammanfattning

Vattenkemin i provpunkt N11-04GW skiljer sig från de övriga och innehåller som tidigare nämnt mycket mer salter och påverkas troligtvis i större utsträckning av vägarna då denna ligger närmare markytan och befinner sig i det tertiära tillrinningsområdet.

För december och januari är det generellt lägre halter av spårämnen i grundvattnet än för proverna från september.

Samtliga grundvattenrör innehåller förhöjda halter av arsenik, och överskrider Livsmedelsverkets gränsvärde. Då arseniken i regel inte påverkas av järnutfällningarna som filtrerats bort i de filtrerade proverna så är det troligtvis den femvärda arseniken som dominerar i detta grundvatten, då denna inte binder till det oxiderade järnet. Den är inte heller lika ohälsosam som det trevärda. Majoriteten av förekomsten för arsenik är troligtvis naturlig, då ingen annan förklaring finns.

Rör N11-04GW och N11-09GW har mycket järn- och manganutfällningar, samt något högre halter av spårämnen. Det beror troligen på att turbiditeten är högre hos dessa, då de innehåller mycket mer kolloider som binder metaller.

Slutsatser

- Infiltration sker från Norrviken till grundvattnet, speciellt för rör N11-19GW och N11-23GW som visar på liknande isotopsammansättning som Norrviken. Dessa rör är belägna längs kanten av Norrviken och påverkas troligen av grundvattenpumpning som jästbolaget utför. Grundvattnet i rör N11-04GW och N11-09GW är lättare och påverkas i större utsträckning av nederbörden.
- Svavlet i grundvattnet är urlakade på ³⁴S som resultat av sulfatreduktion som ägt rum under syrefattiga förhållanden. Detta visar på att sulfider finns i jorden. Högst troligen är dessa sedimentära och inte magmatiska. Rör N11-04GW har högst koncentration av sulfat och har påverkats mer av nederbörden än de övriga grundvattenrören.
- Grundvattnet innehåller förhöjda halter av metaller, och då främst mangan, järn och arsenik. Dessa metaller överskrider gränsvärdet för vad som är hälsosamt enligt Livsmedelsverket. Då arseniken är kvar trots att det oxiderade järnet filtrerats bort så tyder det på att arseniken förekommer som femvärd då denna inte binder till järn. Femvärda arseniken är inte lika giftig som det trevärda. Förekomsten av arsenik är troligtvis naturlig, medan järnet och manganet kan ha påverkats från kontaminering från grundvattenrören. Metallhalterna minskar något under december och januari.

- Grundvattenrör N11-23GW och N11-19 är de rör med lägsta halten av mangan och järn, samt lägst koncentration av spårämnen. Rören N11-04GW och N11-09GW visar på de högsta värdena, men dessa rör karakteriseras av mer siltiga jordarter och påverkas i större utsträckning av det tertiära tillrinningsområdet.

Referenser

- Andréasson, P.-G. (2006). *Geobiosfären, en introduktion*. Lund: Studentlitteratur.
- Björkvald, L., (2008). *Landscape hydrogeochemistry of Fe, Mn, S and trace elements (As, Co, Pb) in a boreal stream network*. Stockholm: Department of geology and geochemistry, Stockholm University.
- Bäckström, M., (2009). *Fördjupad förstudie av gruvavfall vid Rågrecksgruvorna, Nora kommun – Kompletterande sedimentanalyser*, Örebro Universitet.
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology, second edition*. New York: Routledge
- Drever, J. I. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters*. New Jersey: Prentice Hall.
- Eby, G. N. (2004). *Principles of Environmental Geochemistry*. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Eriksson, A., (2009) *Grundvattenmagasinet, Stockholmsåsen - Sollentuna*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.
- Eriksson, K. G., (1960): *Studier över Stockholmsåsen vid Halmsjön*. Geologiska föreningen i Stockholm Förhandlingar, 82:1, 43-125.
- Faure, G (2005). *Isotopes, principles and applications*. John Wiley and sons: New Jersey, USA.
- Grip, H., Rodhe, A. (1985). *Vattnets väg från regn till bäck*. Uppsala: Hallgren & Fallgren Studieförlag AB.
- Hoefs, J. (1973). *Stable isotope geochemistry*. Berlin: Springer-Verlag
- Krouse, H.R., Grinenko, V.A. (1991). *Stable isotopes - Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment*. Chichester: SCOPE 43. John Wiley and sons: New Jersey, USA.
- Livsmedelsverket. (2006). *Vägledning till Livsmedelsverkets föreskrifter (SLVFS 2001:30) om dricksvatten*.
- McSween, Richardson, and Uhle. (2003). *Geochemistry - Pathways and processes*, second edition. New York: Columbia University Press.
- Björkvald, L et al. (2008). *Hydrogeochemistry of Fe and Mn in small boreal streams: The role of seasonality, landscape type and scale*. Department of geology and geochemistry, Stockholm University.
- Berggren, Elert, Gustafsson, Jarvis och Norrström. (2006). *Metallers mobilitet i mark*. Bromma: Naturvårdsverket
- Naturvårdsverket. (2008). *Förslag till gränsvärden för särskilda förorenande ämnen Stöd till vattenmyndigheterna vid statusklassificering och fastställande av MKN*. Bromma Naturvårdsverket.

Petersson, G., (2008) *Kemisk miljövetenskap*, Kap. Försurning. Institutionen för kemi- och bioteknik. Chalmers.

Socialstyrelsen. (2006). *Dricksvattenrening med avseende på arsenik*. Stockholm: Socialstyrelsen.

Stumm, W., (1987) *Aquatic surface chemistry. Chemical processes at the particlewater interface*. New York: John Wiley & Sons.

Stumm, W., Morgan, J.J. (1996) *Aquatic chemistry*. John Wiley and sons: New york, USA.

Internet

<http://www.lansstyrelsen.se/vastmanland/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/verksamheter-med-miljopaverkan/tillsynsvagledning/fororeningsskadade-omraden/borra-pala-grava-2012/fororeningars-spridning.pdf>, 2013-04-15

<http://www.lansstyrelsen.se/orebro/SiteCollectionDocuments/sv/miljo-och-klimat/verksamheter-med-miljopaverkan/fororenade-omraden/rapporter-och-lankar/MTMRapportR%C3%A5greck20090609.pdf>

http://books.google.se/books?id=HwhTSGufJdYC&pg=PA689&lpg=PA689&dq=BaSO4+%2B+V2O5&source=bl&ots=SyuKhVGIWK&sig=qHm3DzGtK_63FVnDehKp3O35iVk&hl=sv&sa=X&ei=JiBDUbfZFYmDtAaFulH4Bw&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=BaSO4%20%2B%20V2O5&f=false, 2013-03-13

<http://www.geol.lu.se/fo-info/DNH-ISOT.pdf>

Stockholms Universitet, Geologiska institutionen

<http://www.geo.su.se/sil>, 2013-03-13

<http://www.nrm.se/faktaomnaturenochrymden/geologi/sverigesgeologi/fjallkedjansbildning.1065.html>, 2013-02-19

Nationalencyklopedin

<http://www.ne.se/j%C3%A4rn/218607>

USGS

<http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/res/funda.html>, 2013-04-15

Bilder

Figur 1, Föreläsning handout, Ian Pitcairn 2012

Figur 2, Krouse, H.R., Grinenko, V.A. (1991). *Stable isotopes - Natural and Antropogenic Sulphur in the Environment*. Chichester: Scientific Committee on the Problems of the Environment (SCOPE). Sida 8.

Figur 3, Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2009). Jordartskarta. Uppsala: SGU.

Figur 4, Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2009). Grundvattenmagasin och tillrinningsområde. Uppsala: SGU

Appendix

Tabell 1

Analys av vatten δD , $\delta^{18}O$ vs VSMOW (‰)

Provpunkt	Månad	δD vs VSMOW (‰)	$\delta^{18}O$ vs VSMOW (‰)
N11-19GW	Sept.	-64,45	-7,77
N11-21GW (a)	Sept.	-76,80	-10,15
N11-21GW (b)	Sept.	-77,79	-10,26
N11-22GW (a)	Sept.	-78,14	-10,82
N11-22GW (b)	Sept.	-76,48	-11,14
N11-23GW	Sept.	-60,69	-8,06
N11-04GW	Sept.	-79,63	-11,67
N11-09GW	Sept.	-78,34	-11,55
N11-19GW	Okt.	-66,37	-7,74
N11-21GW	Dec.	-81,34	-10,70
N11-22GW	Dec.	-80,25	-10,90
N11-23GW	Dec.	-62,47	-7,99
N11-04GW	Dec.	-79,73	-11,36
N11-09GW	Dec.	-79,70	-11,34
N11-19GW	Dec.	-61,91	-8,06
N11-19GW	Jan.	-64,78	-8,59
N11-21GW	Jan.	-81,80	-11,28
N11-22GW	Jan.	-81,48	-11,38
N11-23GW	Jan.	-67,00	-8,83
N11-04GW	Jan.	-82,67	-11,79
N11-09GW	Jan.	-85,27	-12,00
Norråviken A	Feb.	-67,87	-8,97
Norråviken B	Feb.	-67,11	-8,91
Norråviken C	Feb.	-66,60	-8,83

Tabell 2

Analys av bariumsulfat - $\delta^{34}S$ vs CDT

Provpunkt	Månad	$\delta^{34}S$ vs CDT
N11-19GW	Sept.	-0,35
N11-21GW A	Sept.	-0,79
N11-21GW B	Sept.	-0,71
N11-22GW	Sept.	-0,41
N11-04GW	Dec.	1,75
N11-09GW	Dec.	-1,23
N11-19GW	Dec.	-0,56
N11-21GW	Dec.	-1,01
N11-22GW	Dec.	-0,81
N11-23GW	Dec.	-0,45
N11-04GW	Jan.	1,90
N11-09GW	Jan.	-0,67
N11-19GW	Jan.	-0,87
N11-21GW	Jan.	-1,05
N11-22GW	Jan.	-0,10
N11-23GW	Jan.	-0,03

Tabell 3

Analysresultat för provtagning i septemer, december och januari månad

Provpunkt	Månad	Ca	K	Mg	Na	Fe	Mn	Al	Cu	Totalhårdhet	CODMn	fosfat	ammonium	nitrat	nitrit	flourid	klorid	sulfat	färg	lukt	art	alkalinitet	konduktivitet	pH	turbiditet
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(°dH)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mgPu/l)		(mg HCO ₃ /l)	(mS/m)		(FNU)
N11-04GW	Sept.	77	19	25	138	5,47	259	0,5	<2,0	16,6	1,65	<0,040	0,856	<0,500	<0,200	0,684	103	122	<5,0	ingen	-----	430	116	7,6	160
N11-09GW	Sept.	60	12	22	37	0,30	269	0,6	<2,0	13,3	1,29	<0,040	0,275	<0,500	<0,080	1,03	56	45	<5,0	ingen	-----	270	65,6	7,9	83
N11-19GW	Sept.	64	9	8	34	0,28	7	0,9	3,8	10,7	2,36	<0,040	<0,050	0,56	<0,080	0,596	47	35	<5,0	ingen	-----	190	52,7	8	2,4
N11-21GW	Sept.	126	14	18	54	2,9	171	0,5	<2,0	21,7	1,58	<0,040	0,129	<0,500	<0,200	0,634	106	75	<5,0	ingen	-----	340	97,9	7,3	52
N11-22GW	Sept.	141	10	19	27	0,24	58	2,3	3,3	24	2,78	<0,040	<0,050	25,5	<0,200	0,905	42	84	9,5	ingen	-----	370	89,4	7,2	1,8
N11-23GW	Sept.	51	6	7	27	0,08	7	1,9	2,8	8,8	3,33	0,006	<0,050	1,02	<0,080	<0,500	40	30	9,7	ingen	-----	150	44,2	7,4	4,1
N11-04GW	Dec.	76	18	25	145	6,94	242	<0,2	<2,0	16	2,0	<0,040	0,73	<0,500	<0,060	0,7	97	113	<5,0	ingen	-----	430	114	7,6	140
N11-09GW	Dec.	73	12	21	42	1,21	294	<0,2	<2,0	15	1,5	<0,040	0,18	<0,500	<0,060	0,8	84	48	<5,0	svag	metall	210	69,9	7,9	750
N11-19GW	Dec.	65	9	8	33	0,16	6	0,2	4,2	11	2,5	<0,040	<0,050	1,1	<0,050	<0,500	47	37	8,8	ingen	-----	190	52,9	7,6	3,7
N11-21GW	Dec.	126	14	18	66	3,54	156	<0,2	<2,0	22	1,7	<0,040	0,08	<0,500	<0,060	0,68	93	78	<5,0	ingen	-----	360	97,5	7,4	62
N11-22GW	Dec.	138	11	18	40	0,08	52	<0,2	<2,0	24	1,3	<0,040	<0,050	3,6	0,1	0,89	60	73	<5,0	ingen	-----	400	90,8	7,2	3,8
N11-23GW	Dec.	57	6	8	31	0,01	4	0,7	3,2	10	4,3	0,133	<0,050	1,9	<0,050	<0,500	39	31	16,8	ingen	-----	160	45,5	7,5	1,4
N11-04GW	Jan.	80	14	24	128	6,5	220	0,39	<2,0	17	2,5	<0,040	0,73	<0,500	<0,150	0,72	97,4	114	<5,0			430	113	7,7	140
N11-09GW	Jan.	105	9	22	43	8,5	417	<0,2	2,4	20	2,2	<0,040	0,19	<0,500	<0,060	0,93	102	52	<5,0			290	85,8	7,8	92
N11-19GW	Jan.	79	7	8	34	0,4	13	0,88	3,1	13	2,5	<0,040	<0,050	0,71	0,13	<0,500	54,2	42	7,1			210	60	7,6	8
N11-21GW	Jan.	147	11	17	53	4,6	158	0,78	<2,0	24	1,8	<0,040	0,09	<0,500	<0,150	0,63	80,3	75	5,2			380	97	7,3	33
N11-22GW	Jan.	163	9	18	29	0,1	51	1,46	2,3	27,1	2,6	<0,040	<0,050	20	0,23	0,87	42,6	81	10,3			410	91,1	7,2	2
N11-23GW	Jan.	55	5	7	26	0,1	5	13,1	2,9	9	4,8	0,142	<0,050	2	<0,060	<0,500	40,5	31	23,7			160	45	7,5	2

Tabell 4

Analysresultat av metaller för ofiltrerade prover i ppb (µg/l)

Provpunkt	Månad	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Si	Sr	Ti	V	Zn	Zr
N11-21GW	Sept.	3,462	19,97	<DL	109,2	<DL	124000	<DL	<DL	2,151	1398	11050	17860	169,7	10,81	50170	5,697	1,414	<DL	24280	2940	250	4,311775	<DL	<DL	<DL
N11-04GW	Sept.	506,6	18,8	119,6	34,44	<DL	74130	<DL	1,091	2,472	5550	13470	24910	207,5	4,483	175000	6,505	36,56	5,092	36770	3726	306,4	74,41743	2,288	3,587	<DL
N11-09GW	Sept.	99	5,047	32,75	12,41	<DL	63120	<DL	<DL	1,374	1577	9626	22080	177	6,04	35790	4,544	7,785	<DL	14620	1284	198,4	10,3782	0,8346	1,387	<DL
N11-19GW	Sept.	2,662	<DL	<DL	28,93	<DL	63640	<DL	<DL	4,093	19,09	7086	7730	<DL	2,113	32100	3,428	7,586	<DL	11440	1721	118,7	<DL	<DL	<DL	<DL
N11-21GW	Sept.	3,068	<DL	<DL	108	<DL	121600	<DL	<DL	0,6537	1734	10860	17540	151,4	2,397	49530	6,194	23,84	<DL	23940	2859	246,2	2,449126	0,7023	<DL	<DL
N11-22GW	Sept.	3,178	13,39	167,2	42,52	<DL	137900	<DL	<DL	4,52	68,89	8397	19300	43,81	7,468	24900	4,534	8,349	<DL	26140	3100	243,7	2,884884	<DL	0,9753	<DL
N11-23GW	Sept.	40,57	16,18	90,58	45,92	<DL	136800	<DL	<DL	5,272	233,4	8353	19160	59,08	7,042	24870	6,243	3,884	<DL	27240	3180	242,1	9,147826	<DL	1,001	<DL
N11-23GW	Sept.	3,507	9,788	99,6	17,98	<DL	50990	<DL	<DL	2,824	21,39	4770	7262	<DL	0,632	25510	4,923	51,88	<DL	10010	1079	110,9	<DL	<DL	<DL	<DL
N11-04GW	Dec.	367,4	3,334	250,3	38,59	<DL	77010	<DL	1,041	2,127	6976	13170	25000	214,8	4,468	164000	4,032	13,74	<DL	35650	3456	310,3	55,62006	0,7594	2,597	<DL
N11-09GW	Dec.	199,3	12,12	<DL	24,86	<DL	92860	<DL	<DL	<DL	7245	9111	21490	318,5	8,057	34700	4,907	32,53	<DL	20190	2069	239	22,63921	<DL	2,037	<DL
N11-19GW	Dec.	3,558	9,248	<DL	29,04	<DL	65300	<DL	<DL	5,541	48,78	7184	7667	17,05	0,729	28310	1,418	9,265	<DL	11670	1647	119,6	<DL	<DL	<DL	<DL
N11-21GW	Dec.	2,592	16,58	<DL	111,5	<DL	128800	<DL	<DL	<DL	1897	11590	18520	148,7	4,74	54970	7,632	<DL	<DL	25680	3024	261,4	1,449448	<DL	0,5455	<DL
N11-23GW	Dec.	2,616	2,585	176,1	43,92	<DL	138200	<DL	<DL	1,218	6,675	9151	19080	52,58	4,075	33380	3,947	<DL	<DL	23300	3263	246,6	2,158622	<DL	0,9544	<DL
N11-23GW	Dec.	3,813	1,685	<DL	16,69	<DL	55170	<DL	<DL	3,349	61,16	4810	7506	1,35	1,537	25370	1,345	63,1	<DL	10230	1792	117,7	<DL	1,239	<DL	<DL
N11-04GW	Jan.	294,4	1,449	82,43	37,34	<DL	79350	<DL	<DL	0,7142	6225	13180	25080	217,8	2,974	157300	2,291	36,96	<DL	34740	3299	317	39,94134	0,7688	3,792	<DL
N11-09GW	Jan.	129,8	1,859	<DL	18,92	<DL	100500	<DL	<DL	0,8254	5571	9377	22750	338,4	3,731	40790	7,134	12,7	2,43	17550	1609	249,9	17,33323	0,7328	1,252	<DL
N11-19GW	Jan.	4,311	15,8	40,8	27,09	<DL	73320	<DL	0,795	4,956	142,6	7328	8889	22,77	1,091	32760	2,728	5,127	<DL	14220	1668	135,6	<DL	<DL	<DL	<DL
N11-21GW	Jan.	1,861	15,02	<DL	97,11	<DL	122500	<DL	<DL	0,9916	1678	10870	17620	158,1	2,69	50410	5,481	5,12	<DL	24990	2853	246,6	0,953881	<DL	<DL	<DL
N11-22GW	Jan.	4,179	3,605	92,59	50,98	<DL	140100	<DL	<DL	4,146	24,66	8798	19590	39,01	7,564	27930	4,056	4,418	<DL	25030	3274	248,2	1,816851	<DL	1,486	<DL
N11-23GW	Jan.	12,77	<DL	<DL	21,19	<DL	54110	<DL	<DL	3,217	75,66	5000	7246	<DL	<DL	25550	2,553	64,05	<DL	10180	2174	114,7	<DL	<DL	<DL	<DL

* <DL betyder under detektionsgräns

Tabell 5

Analysresultat av metaller för filtrerade prover i ppb (µg/l)

Provpunkt	Månad	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Si	Sr	Ti	V	Zn	Zr
N11-04GW	Sept.	2,184	7,255	196,4	35,62	<DL	76230	1,623	0,9376	<DL	4830	13440	25180	224,7	7,191	180900	3,808	12,31	1,843	37720	2617	314,6	3,71368	0,6858	2,193	<DL
N11-09GW	Sept.	2,126	15,78	82,15	9,781	<DL	60400	0,604	<DL	2,614	12,77	9799	22280	229,2	7,817	35940	7,001	1,338	<DL	14200	925	192,1	3,05577	1,478	0,928	<DL
N11-19GW	Sept.	2,825	9,328	<DL	27,12	<DL	63710	0,854	1,209	5,514	25,66	7097	7685	0,6071	3,374	32170	1,783	<DL	<DL	11440	1744	118,7	2,82507	1,865	1,201	<DL
N11-21GW	Sept.	1,231	17,68	<DL	106,3	<DL	123600	0,578	0,6237	0,8709	136,7	11000	17760	166,2	3,679	49960	6,388	12,38	<DL	24160	2887	249,2	4,71336	0,8075	0,8362	<DL
N11-22GW	Sept.	2,249	8,802	<DL	51,88	<DL	137200	0,764	<DL	3,391	6,868	8452	19350	60,93	7,122	25180	5,633	<DL	<DL	27150	3176	242,6	4,85861	0,9229	1,438	<DL
N11-22GW	Sept.	4,249	<DL	98,55	43,61	<DL	139600	0,87	1,043	5,003	15,67	8607	19580	56,91	7,631	25310	3,341	<DL	1,209	26190	3204	246,6	4,43994	0,9311	1,786	<DL
N11-23GW	Sept.	1,929	9,609	213,6	20,11	<DL	51590	0,584	0,691	3,389	34,86	4737	7255	0,8734	1,971	25770	3,139	24,84	<DL	10100	1108	111,6	1,12477	0,7871	1,308	<DL
N11-19GW	Oct.	3,329	9,56	74,15	27,42	<DL	60410	0,502	<DL	5,056	44,58	7253	7154	<DL	2,654	29220	3,293	27,73	<DL	10650	1794	111,9	1,61179	0,5404	0,7363	<DL
N11-04GW	Dec.	1,792	<DL	152,8	29,03	<DL	77340	<DL	<DL	1,143	2239	13180	25230	240,1	4,819	167200	4,792	7,603	<DL	35370	2482	309,8	2,35514	<DL	<DL	<DL
N11-09GW	Dec.	2,829	<DL	86,16	9,941	<DL	74830	<DL	<DL	0,8434	244,4	9094	20840	220,3	6,402	34250	3,212	2,967	<DL	17200	991,7	212,7	1,9621	<DL	<DL	<DL
N11-19GW	Dec.	3,097	9,659	<DL	25,49	<DL	64970	<DL	<DL	4,27	29,06	7130	7753	<DL	2,733	28490	0,978	<DL	0,799	11550	1648	120	1,32983	<DL	1,02	<DL
N11-21GW	Dec.	2,119	11,81	19,34	104,7	<DL	120700	<DL	<DL	1,458	229,1	10920	17320	151,1	<DL	51380	6,95	2,763	<DL	24660	2924	243,6	2,91906	<DL	0,6339	<DL
N11-22GW	Dec.	2,485	3,324	33,28	51,26	<DL	132900	<DL	<DL	2,206	1,57	8809	18370	61,04	4,844	32580	4,189	1,001	<DL	22990	3248	237,2	3,37191	<DL	1,368	<DL
N11-23GW	Dec.	4,589	4,184	18,4	21,79	<DL	54770	<DL	<DL	3,638	38,79	4787	7490	15,4	2,943	25230	3,189	67,08	<DL	10040	1802	117,3	<DL	<DL	0,6572	<DL
N11-04GW	Jan.	2,854	7,909	308,4	28,09	<DL	78220	<DL	<DL	0,7634	514,1	12940	24750	219,1	4,659	157900	2,414	3,698	<DL	34290	2434	310,7	0,80863	<DL	1,096	<DL
N11-09GW	Jan.	3,048	2,94	3,492	13,44	<DL	95430	<DL	<DL	0,9351	393,1	9515	22980	377,3	4,541	40780	7,132	13,48	<DL	16440	999,2	245,1	1,41527	<DL	<DL	<DL
N11-19GW	Jan.	2,686	5,927	<DL	27,77	<DL	73800	<DL	<DL	4,09	64,52	7388	8866	17,33	1,52	33180	4,253	5,323	<DL	14020	1659	136,4	0,97951	<DL	0,756	<DL
N11-21GW	Jan.	3,119	3,379	<DL	95,71	<DL	124300	<DL	<DL	<DL	323,9	11100	17970	180,3	2,131	51380	4,415	2,14	<DL	24780	2865	251,1	1,92793	<DL	<DL	<DL
N11-22GW	Jan.	3,039	15,32	151,1	51,81	<DL	140400	<DL	<DL	3,434	9,313	8775	19620	59,73	5,232	28130	4,188	7,342	<DL	24760	3286	250	2,75672	<DL	2,101	<DL
N11-23GW	Jan.	11,79	22,95	73,86	20,83	<DL	53730	<DL	<DL	3,622	53,82	4973	7244	<DL	<DL	25410	2,11	76,98	<DL	10030	2145	113,6	<DL	1,039	0,9733	<DL

* <DL betyder under detektionsgräns