
Svenskt Vatten

UTVECKLING

Rapport
Nr 2021-12

Spårning av råvattenursprung i vattentäkter

Analystekniker och tolkningsverktyg

Anders Widerlund
Viktor Eriksson Solander
Simon Pontér
Stacy Sutliff-Johansson

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

RAPPORTENS TITEL	Spårning av råvattenursprung i vattentäkter. Analystekniker och tolkningsverktyg
TITLE OF THE REPORT	Tracing water origin in drinking water sources. Analysis techniques and interpretation tools
FÖRFATTARE	Anders Widerlund, Viktor Eriksson Solander, Simon Pontér, Stacy Sutliff-Johansson, Luleå tekniska universitet
RAPPORTNUMMER	2021-12
ANTAL SIDOR	39
SAMMANDRAG	Rapporten beskriver hur miljöforensik kan tillämpas vid dricksvattentäkter för att spåra ursprunget till vatten och föroreningar. I studien kombinerades screening- och isotopanalyser för att spåra vattenkvalitetsförändringar kopplade till havsvattenintrång och ytvatteninfiltration i vattentäkter. För att underlätta tolkningen av data behöver det också utvecklas ett tolkningsverktyg.
SUMMARY	The report describes how Environmental Forensics can be applied at drinking water sources to trace the origin of water and pollutants. The study combines screening and isotope analyses to trace intrusion of sea water and surface water infiltration in drinking water sources. To facilitate the interpretation of data, it is suggested that a software-based interpretation tool should be developed.
SÖKORD	Miljöforensik, klimatförändring, spårning, screeninganalys, isotoper
KEYWORDS	Environmental Forensics, climate change, tracing, screening analysis, isotopes
MÅLGRUPPER	Tjänstemän och konsulter inom dricksvattenförsörjning
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGÅR	2021
UTGIVARE	© Svenskt Vatten AB
REFERENS	Widerlund A., Eriksson Solander V., Pontér S. och Sutliff-Johansson S. (2021). Spårning av råvattenursprung i vattentäkter. Analystekniker och tolkningsverktyg. SVU-rapport 2021-12. Stockholm, Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	19-103
PROJEKTETS NAMN	Nya analystekniker för dricksvattentäkter
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling, Luleå tekniska universitet

Förord

Projektet som redovisas i den här rapporten är inriktat mot Svenskt Vattens forskningsområde Dricksvatten, och det särskilt prioriterade området ”Analys- och mätmetodik för utveckling av metoder för driftuppföljning samt kontroll och tidig upptäckt av föroreningspåverkan”. Avsikten är att projektet ska bidra till utveckling av nya analysmetoder och tolkningsverktyg för att spåra och kvantifiera föroreningar och föroreningskällor vid vattentäkter.

Projektet har utförts vid Avdelningen för geovetenskap och miljöteknik inom forskningsämnet Tillämpad geokemi vid Luleå tekniska universitet. Projektet har pågått under tiden 2019-07-01 till 2020-12-31, och har finansierats av Svenskt Vatten Utveckling och Luleå tekniska universitet.

Luleå kommuns reservvattentäkt vid Gäddvik har fungerat som provområde för utveckling och tillämpning av framtagna tekniker. Provtagning, kemiska analyser och tolkning av data har utförts av doktoranderna Simon Pontér och Stacy Sutliff-Johansson som arbetat i projektet vid Avdelningen för geovetenskap och miljöteknik, och ett examensarbete har utförts av Viktor Eriksson Solander inom ramen för projektet.

De kemiska analyserna har i huvudsak utförts vid ALS Scandinavia AB i Luleå, som tillsammans med AFRY (ÅF Pöyry) i Luleå även bidragit med projektplanering och tolkning av data.

Vi tackar Luleå kommun som bidragit med värdefulla diskussioner, information om vattentäkter och praktisk hjälp vid vattenprovtagning.

Anders Widerlund

Innehåll

Förord.....	2
Sammanfattning.....	4
Summary	5
1 Inledning	6
1.1 Syfte och frågeställningar	6
2 Bakgrund	7
2.1 Vattentäkter och klimatpåverkan	7
2.2 Framtida behov inom dricksvattenskydd.....	9
3 Tekniker för spårning av råvattenursprung	10
3.1 Analystekniker	11
3.2 Tolkningsmetodik.....	12
4 Fältområde	18
5 Metoder	20
5.1 Vattenprovtagning.....	20
5.2 Kemiska analysmetoder	20
5.3 Tolkningsmetoder	21
6 Resultat och diskussion	23
6.1 Isotop- och screeninganalyser för spårning av grundvatten.....	23
6.2 Yt- och havsvattenintrång i vattentäkter.....	26
6.3 Datavisualisering i triangeldiagram – generella exempel.....	31
7 Slutsatser och fortsatt arbete	34
7.1 Kemiskt analyspaket	34
7.2 Tolkningsverktyg.....	35
Referenser	37

Sammanfattning

Rapporten beskriver hur miljöforensik kan tillämpas vid dricksvattentäkter för att spåra ursprunget till vatten och föroreningar. I studien kombinerades screening- och isotopanalyser för att spåra vattenkvalitetsförändringar kopplade till havsvattenintrång och ytvatteninfiltration i vattentäkter. För att underlätta tolkningen av data behöver det också utvecklas ett tolkningsverktyg.

Dricksvattentäkter är en av våra viktigaste naturresurser, och att långsiktigt säkra kommunal dricksvattenförsörjning är ett grundläggande samhällsintresse. Ett förändrat klimat innebär nya risker för samhällets dricksvattenförsörjning, där förändringar i temperatur och nederbörd samt stigande havsnivå förväntas påverka råvattentillgång och vattnets kvalitet i vattentäktarna.

För att utveckla möjligheterna att spåra källor och transportvägar för råvatten i anslutning till dricksvattentäkter föreslår rapportförfattarna från Luleå tekniska universitet att det utvecklas dels ett kemiskt analyspaket där ett antal huvudparametrar ingår som kan fungera som indikatorer för vatten av olika ursprung, dels ett mjukvarubaserat tolkningsverktyg.

I projektet har miljöforensik (Environmental Forensics) tillämpats, där kemiska analystekniker har kombinerats med metoder för att tolka analysdata. Miljöforensik definieras som systematisk tillämpning av fysisk, kemisk och historisk information för att presentera vetenskapliga och juridiska slutsatser när det gäller källor och tidpunkter för utsläpp av föroreningar i miljön.

Arbetet har huvudsakligen utförts vid Luleå kommuns reservvattentäkt vid Gäddvik, men även data från kommunens huvudvattentäkt vid vattenverket i Gäddvik har använts. Avsikten har varit att använda dessa två vattentäkter för att demonstrera tekniker som är generellt användbara även för andra vattentäkter.

Kombinationen av grundämnes- och isotopdata som använts i studien har stor potential som verktyg för att karaktärisera och spåra källor och transportvägar för vatten i anslutning till vattentäkter. Screeninganalyser ger data för ett stort antal grundämnen som dels kan användas för att tolka geokemiska processer, dels kan indikera förekomst av ett antal spårmetaller som är nyckelkomponenter i ny teknik, bland annat i batterier för fordon, och vars halter i mark och vatten förväntas öka i framtiden. Kvoter mellan vissa grundämnen och magnesium har använts för att indikera olika vattentyper, till exempel älvvatten och havsvatten. Kvalitetsskillnader mellan den lågt exploaterade reservvattentäkten och Luleå kommuns huvudvattentäkt kunde observeras med hjälp av syre- och väteisotoper, där huvudvattentäkten visade större inflöden av ytvatten på grund av infiltrationen av vatten från Luleälven.

För att standardisera och förenkla tolkningen av vattenkemiska data från det föreslagna analyspaketet bör det utvecklas ett användarvänligt mjukvarubaserat tolkningsverktyg där data matas in och resultaten efter beräkningar presenteras i olika diagramtyper som illustrerar förekomsten av vatten med olika ursprung. Projektet har utarbetat en struktur för mjukvara som kan utvecklas som tolkningsverktyg.

Summary

The report describes how Environmental Forensics can be applied at drinking water sources to trace the origin of water and pollutants. The study combines screening and isotope analyses to trace intrusion of sea water and surface water infiltration in drinking water sources. To facilitate the interpretation of data, it is suggested that a software-based interpretation tool should be developed.

Drinking water sources are one of our most important natural resources, and securing long-term municipal drinking water supply is a fundamental public interest. A changed climate entails new risks for society's drinking water supply, where changes in temperature, precipitation, and rising sea levels are expected to affect water supply and quality at water sources.

In the present project, Environmental Forensics methodology has been applied, where chemical analysis techniques have been combined with methods for interpreting this analysis data. The overall purpose of the project is to develop analysis methods and interpretation tools to trace the origin of waters and pollution sources at municipal water sources.

The work has mainly been carried out at Luleå municipality's back-up water source at Gäddvik, but data from the municipality's main water source (waterworks) at Gäddvik have also been used. The intention has been to use these two water sources to demonstrate general techniques that can be applied at other water sources as well.

The combination of elemental and isotopic data used in this study shows great potential as a tool for characterization / tracking of sources and transport routes for water adjacent to water sources. Screening analyzes provide data for a large number of elements that can be used to interpret geochemical processes, and can indicate the presence of so-called Technology-Critical Elements (TCE's) whose levels in soil and water are expected to increase in the future. Element/Mg ratios have been used to indicate different types of water, e.g., river water and seawater. Quality differences between the back-up water source and Luleå municipality's main water source can be observed with the help of oxygen and hydrogen isotopes, where the main water source shows larger inflows of surface water due to the infiltration of water from the Lule River.

By plotting the above element and isotope data in different diagram types, the presence of water with different origins is illustrated. In order to develop the possibilities of tracing sources and transport routes for water in connection with municipal drinking water sources, it is proposed 1) that a chemical analysis package be developed, which includes a number of main parameters that can serve as indicators for water of different origins, and 2) a software-based interpretation tool be developed to facilitate the interpretation of water analysis data.

1 Inledning

Förutsättningarna för en säker dricksvattenförsörjning påverkas av många faktorer. Vattentäkter är i många fall sårbara för klimatförändringar och föroreningar (SOU, 2015), och klimatpåverkan i kombination med nya och / eller kända föroreningar utgör därmed två stora utmaningar för att långsiktigt säkra kommunal dricksvattenförsörjning (Livsmedelsverket, 2019, Svenskt Vatten, 2019). I komplexa miljöer som grundvattenmagasin där det finns ett flertal naturliga och antropogena källor till föroreningar kan det vara svårt att identifiera och kvantifiera olika källors betydelse. Alltmer sofistikerade analysmetoder och sätt att spåra källor för grundvatten och föroreningar efterfrågas därför av dricksvattenbranschen.

Under det senaste årtiondet har forskningsområdet Environmental Forensics (miljöforensik) vuxit fram. Environmental Forensics definieras som en systematisk och vetenskaplig tillämpning av fysisk, kemisk och historisk information för att presentera välgrundade vetenskapliga och juridiska slutsatser vad avser källor och tidpunkter för utsläpp av föroreningar i miljön (Murphy och Morrison, 2014). Environmental Forensics är ett växande forskningsområde vid forskningsämnet Tillämpad geokemi vid Luleå tekniska universitet, där forskningsämnets goda kemiska analysmöjligheter utnyttjas.

Projektet som redovisas i den här rapporten har varit inriktat mot generell spårning av vattnets ursprung i dricksvattentäkter, inte mot enskilda specifika föroreningar. Projektet har begränsats till att i huvudsak omfatta analyser av oorganiska ämnen (metaller och syre-/väteisotoper).

I projektet har miljöforensiska metoder tillämpats, där kemiska analystekniker kombinerats med metoder för att tolka dessa analysdata. Arbetet har huvudsakligen utförts vid Luleå kommuns reservvattentäkt vid Gäddvik, men även data från kommunens huvudvattentäkt (vattenverket) vid Gäddvik har använts. Avsikten har varit att använda dessa två vattentäkter för att demonstrera tekniker som är generellt användbara även vid andra vattentäkter.

1.1 Syfte och frågeställningar

Projektets övergripande syfte är att utveckla tillämpningen av screening- och isotopanalyser för att spåra vattenursprung och föroreningskällor vid vattentäkter, och att demonstrera hur ett tolkningsverktyg kan användas för att tolka dessa data. Projektet ska därigenom bidra till att långsiktigt säkra kommunal dricksvattenförsörjning. Projektet har följande två delmål:

- *Analystillämpning.* Utvärdera hur screening- och isotopanalyser kan tillämpas som redskap för att spåra källor och spridningsvägar för föroreningar vid dricksvattentäkter
- *Tolkningsverktyg.* Föreslå en grundstruktur för ett programvarubaserat tolkningsverktyg för dessa analyser

Avsikten är att de utvecklade teknikerna i delmålen ska kunna tillämpas vid:

- Generell spårning av grundvatten- och föroreningskällor vid vattentäkter
- Prediktering av områden i anslutning till vattentäkter som kan vara särskilt föroreningskritiska vid klimatförändringar
- Riskbedömningar och upprättande av skyddsområden för vattentäkter

2 Bakgrund

2.1 Vattentäkter och klimatpåverkan

Dricksvattentäkter är en av våra viktigaste naturresurser, och att långsiktigt säkra kommunal dricksvattenförsörjning är ett grundläggande samhällsintresse. Vattentäkter har historiskt sett alltid varit känsliga för miljöpåverkan, och normalt upprättas skyddsområden för att skydda vattentäkter mot föroreningar (Naturvårdsverket, 2011). Ett förändrat klimat innebär dock nya risker för samhällets dricksvattenförsörjning, där förändringar i temperatur, nederbörd, vattentillgång, grundvattenbildning, grundvattenflöden och stigande havsnivå förväntas påverka råvattentillgång och kvalitet vid vattentäkter (SOU, 2015). Dricksvattenförsörjningen är ett komplext system, och klimat- och sårbarhetsutredningen från 2007 betonade vikten av att i forsknings- och utvecklingssammanhang se på hela systemet för dricksvattenförsörjning (SOU, 2007). I denna bakgrundsbeskrivning ges endast en översikt av de klimataspekter där möjligheter att spåra råvattnets ursprung i vattentäkter har betydelse. Nedanstående översikt är en sammanfattning av den beskrivning av klimateffekter på yt- och grundvattenkvalitet som ges i SOU (2015).

2.1.1 Temperatur

Ett antal klimatscenarier har tagits fram för att beskriva hur jordens medeltemperatur kan förändras fram till år 2100. Beroende på vilket scenario som används beräknas medeltemperaturen i Sverige år 2100 att vara 2–6 °C högre jämfört med referensperioden 1961–1990 (SMHI, 2020a). Temperaturökningen förutsägs bli särskilt markant i norra Sverige, och särskilt vintertid.

Värmeböljor

Långvariga värmeböljor med torka och avdunstning påverkar redan idag vattenförsörjningen. Minskad tillgång till yt- och grundvatten är en direkt effekt av torka och avdunstning, något som påverkat vattenförsörjningen i mellersta och sydöstra Sverige under senare år. Ökade koncentrationer av föroreningar på grund av minskade vattenvolymer i yt- och grundvatten är en indirekt effekt av långvariga perioder med torka och avdunstning.

Vattentemperatur

I ett längre tidsperspektiv kommer en ökning av Jordens medeltemperatur att ge varmare vatten i sjöar och vattendrag. På sikt ökar detta risken för algbloomningar, vilket i sin tur kan påverka råvattenkvaliteten i form av lukt- och smakstörande ämnen, algtoxiner och andra typer av organiska ämnen. Varmare ytvatten ökar även risken för tillväxt av mikroorganismer i ledningsnäten, vilket kan ge allvarliga störningar i dricksvattenförsörjningen.

2.1.2 Nederbörd, vattentillgång och flöden

De klimatrelaterade risker som kommer att påverka dricksvattenförsörjningen är framför allt kopplade till ökad nederbörd och vattentillgång, samt större flöden i vattendrag (SOU, 2015). Medelnederbörden förväntas generellt öka i hela landet, och SGU:s beräkningar visar på höjda grundvattennivåer i större delen av Sverige. I östra Götaland och Svealand förväntas dock lägre vattenflöden bli vanligare. Här beräknas även grundvattennivåerna sjunka. Förändringarna bedöms få störst inverkan i de stora grundvattenmagasinen som är betydelsefulla för den allmänna dricksvattenförsörjningen

Översvämningar

Ökade nederbörds mängder ökar risken för översvämningar, vilket kommer att påverka utbytet mellan grund- och ytvatten. Detta är i sin tur ett hot mot dricksvattentäkter om mikroorganismer och kemiska föroreningar skulle nå grund- och ytvattentäkter. Problematiken och risker vid översvämningar diskuteras mer utförligt i SOU (2015).

Vattenbrist

Även om nederbörds mängden i Sverige generellt kommer att öka enligt modellerade klimatscenarioer förväntas även vattenbrist kunna uppstå under perioder med torka. Detta gäller t ex Blekinge, Gotlands och Kalmar län, där låga grundvattennivåer periodvis förekommer redan idag. Låga grundvattennivåer kan förväntas leda till ett förändrat utbyte mellan grund- och ytvatten, och i kustnära områden dessutom ökad saltvatteninträngning.

Kemiska och mikrobiologiska risker

Ökade vattenflöden och förändringar i utbytet mellan grund- och ytvatten kan medföra ökade risker för kontaminering av dricksvattentäkter. Studier av Sveriges geologiska undersökning har visat ett samband mellan koncentrationer i grundvatten och grundvattennivåer (SGU, 2012). Perioder med kraftig nederbörd i kombination med perioder av torka ökar risken för att föroreningar i mark kan nå dricksvattentäkter. En ökad urlakning av metaller som troligen orsakas av varierande grundvattennivåer ses även i områden med skura sulfatjordar (Erixon, 2009).

Koncentrationerna av humusämnen eller naturligt organiskt material (NOM) har ökat i svenska vattendrag sedan 1970-talet, och denna sk brunifiering av ytvatten anses delvis vara en effekt av ett varmare klimat. Förutom högre halter av NOM har även högre halter av järn uppmätts i vattnen (Kritzberg och Ekström, 2012). Vid ökade vattenflöden förväntas uttransporten av NOM öka (SOU, 2015). Dessa humusämnen kan även fungera som komplexbindare för många metaller (Frimmel m fl., 1983), något som ökar risken för att metallföroreningar kan nå dricksvattentäkter.

En ökad lufttemperatur som ger ökade vattentemperaturer kan öka tillväxten av mikroorganismer, bakterier och alger. Vid ökade nederbörds mängder och vattenflöden ökar risken att dessa når dricksvattentäkter och påverkar råvattenkvaliteten negativt (SOU, 2015).

2.1.3 Havnivåhöjning och saltvatteninträngning

Den globala uppvärmningen påverkar redan idag den globala havsytans nivå. Under perioden 1993–2010 uppmättes stigningen till 3,2 mm/år. I klimatscenarioet RCP8.5 med de högsta utsläppen av växthusgaser beräknas havsytans nivå stiga med 52–98 cm fram till år 2100 (SMHI, 2020b).

I stora delar av Sverige motverkas havsytans höjning av den landhöjning som fortfarande pågår efter den senaste istiden. Vid Bottenvikens kust motverkas havsytans höjning i stort sett helt av landhöjningen, men i södra Sverige, där landhöjningen är obetydlig, kommer dock kusten att påverkas av hela den beräknade stigningen (52–98 cm för scenarioet med de högsta utsläppen).

Havnivåhöjningen ökar risken för saltvatteninträngning i kustnära dricksvattentäkter. Mycket höga salthalter kan förekomma vid stora uttag i djupa brunnar på avstånd upp till 200 m från kusten (SGU, 2007). Risken för saltvatteninträngning är på sikt det största hotet mot Mälaren som dricksvattentäkt. Vid en höjning av Östersjöns nivå med 50 cm skulle saltvatteninträngning i Mälaren kunna ske under 60 dagar per år (SOU, 2015). I vattentäkter belägna under Högsta kustlinjen, den högsta nivå som havet nådde upp till efter senaste istiden, finns risk för inträngning av gammalt, relik havsvatten. Detta har t ex observerats i Luleå kommuns huvudvattentäkt vid Gäddvik (Lempinen, 2019).

2.2 Framtida behov inom dricksvattenskydd

Ett förslag som framförts är att utveckla en rikstäckande sårbarhetskarta för vattentäkter med hänsyn till klimatbetingade risker. Ett sådant planeringsverktyg skulle kunna integrera befintlig information om grundvattenförekomster, jordarter, markanvändning, och översvämningsrisker (SOU, 2015). Verktöget skulle även innehålla data från de inventeringar av förorenade områden som genomförts av länsstyrelser. De kemiska analyser som utförs vid framtida inventeringar av förorenade områden bör, förutom kända föroreningar, även omfatta de element och isotoper som kan användas för spårning av källor för vatten och föroreningar. En föroreningskällas element- och isotopsammansättning kan då karakteriseras tillräckligt väl för att kunna användas som en ändkomponent i blandningsmodeller (se 3.2.2).

Svenskt Vatten Utveckling identifierade 2014 prioriterade forskningsområden som bl a rörde behovet av fördjupade riskanalyser, och att rätt indata säkras för analyserna (SVU, 2014). Flera av de identifierade framtida behoven sammanhänger med utveckling av analystekniker för att detektera mikroorganismer och kemiska föreningar. Det finns ett antal spårmetaller som tidigare inte använts i tekniska tillämpningar i någon större utsträckning, men som idag är nyckelkomponenter i ny teknik, bl a batterier för fordon. Dessa metaller kallas ofta Technology-Critical Elements (TCE's) och inkluderar gallium, germanium, indium, niob, tantal, tellurium, tallium, metallerna i platinagruppen och de flesta av de s. k sällsynta jordartsmetallerna. För de flesta av dessa metaller är förståelsen av deras koncentrationer och fördelning i mark, vatten och biologiskt material idag begränsad. På grund av deras ökade användning i en mängd olika tekniska applikationer kan halterna av dessa metaller förväntas öka i mark och vatten. Detta kan påverka hur dessa metaller rör sig i grund- och ytvatten, inklusive dricksvattentäkter, och potentiella biologiska risker behöver undersökas ytterligare (Watari m fl, 2020).

Dessa metaller ingår normalt inte i de analyspaket som används vid rutinanalyser av vatten, där ca 20–25 olika metaller bestäms (ALS, 2021). För bestämningar av halter av TCE's behöver en s k screeninganalys utföras, som omfattar ca 70 element / metaller.

3 Tekniker för spårning av råvattenursprung

Riskbedömningar för råvattentäkter är ett område där nya analystekniker och möjligheter att spåra råvattnets ursprung och flödesvägar är av stor betydelse. Vid spårning av ett råvattens ursprung kan två principiellt olika spårningstekniker användas (Kendall och Caldwell, 1998):

- 1) spårning av ett vattnens ursprung
- 2) spårning av lösta ämnens ursprung

Spårning av ett vattnens ursprung kan göras framför allt med hjälp av syre- och väteisotoper. Huvudsyftet med spårning av lösta ämnens ursprung är oftast att spåra ämnets specifika källa, men även denna typ av spårning kan indirekt visa ett vattnens ursprung. Detta gäller t ex för elementen Na och Sr som kan indikera en havsvattensignal.

Vanliga frågeställningar vid spårning av råvattnets ursprung och vattenkvalitetsförändringar i dricksvattentäkter kan t ex gälla att:

1. skilja mellan grundvatten och ytvatten
2. spåra saltvatteninträngning
3. spåra specifika föroreningar
4. indikera avdunstning

Dessa frågeställningar är ofta direkt eller indirekt kopplade till de klimateffekter som kan förväntas påverka vattentillgång och vattenkvalitet vid råvattentäkter (se avsnitt 2.1). Grundvattentäkter är ofta belägna i rullstensåsar som är i direkt kontakt med älvar och sjöar, och i många fall används dessutom konstgjord infiltration där ytvatten infiltrerar ner till grundvattentäkten (se avsnitt 4). Vid många vattentäkter förekommer därför ett utbyte mellan ytvatten och grundvatten, och möjligheten att spåra ytvatteninträngning i grundvattentäkter är av stor betydelse.

Spårning av ett råvattens ursprung och eventuella klimateffekter vid vattentäkter kräver dels lämpliga analystekniker för att analysera indikatorparametrar, dels metoder för att tolka dessa data. Tabell 3.1 sammanfattar de analystekniker och kvalitativa respektive kvantitativa tolkningsmetoder som kan användas vid olika frågeställningar.

Tabell 3.1

Analystekniker och tolkningsmetoder användbara vid olika frågeställningar i samband med spårning av råvattenursprung.

Analysteknik	Tolkningsmetod	
	Kvalitativ tolkning	Kvantitativ tolkning
ICP-MS Screeninganalyser	Elementhalter (Na, S, Sr m fl) ² Elementkvoter ^{2,3} Halter av specifika föroreningar ³ Cerium-anomali ¹	Elementhalter (Na, S, Sr m fl) ⁴ Elementkvoter ⁴ Halter av specifika föroreningar ³
ICP-MS Isotopanalyser	Bor-, litium- och strontiumisotoper ^{1,2} Isotoper för specifika föroreningar ³	Bor-, litium- och strontiumisotoper ^{1,2} Isotoper för specifika föroreningar ³
Gas-IRMS	Syre- och väteisotoper ¹	Syre- och väteisotoper ¹
Automatisk övervakning	Elektrisk konduktivitet ^{2,4} Elementhalter ^{2,3}	Elektrisk konduktivitet ^{2,4} Elementhalter ^{2,3}

Redovisade analystekniker och tolkningsmetoder är användbara vid följande frågeställningar:

¹ Skilja mellan grund- och ytvatten

² Spåra saltvatteninträngning

³ Spåra specifika föroreningar

⁴ Indikera avdunstning

3.1 Analystekniker

Nedan ges en kort översikt av de analystekniker som normalt används för de spårningsmetoder som redovisas i tabell 3.1.

Haltbestämning och screeninganalyser med ICP–MS

ICP-tekniken är idag den mest använda analysmetoden för rutinmässiga elementanalyser i vattenprover och fasta material. Tekniken innebär att en induktivt kopplad plasma (ICP) används för att jonisera provet innan elementhalterna bestäms med optisk emissionsspektrometri (ICP–AES) eller masspektrometri (ICP–MS). Vid ICP–MS separeras jonerna efter massa till laddningsförhållandet i en masspektrometer, och de olika elementen i ett prov kan då skiljas åt och haltbestämmas (ALS, 2021). ICP-tekniken är en sk multielementteknik, där 20–25 olika huvud- och spårelement rutinmässigt kan bestämmas i en enskild analys. I ett vatten ger huvudelementhalterna ofta information om vattnets ursprung, medan eventuella föroreningar ofta återfinns bland spårelementen.

Efterfrågan på att kunna bestämma fler än 20–25 element ökar, och ICP-teknikens utveckling under senare år har gett möjlighet att idag bestämma halterna av ca 70 element i en enskild analys. Dessa sk screeninganalyser ger därför betydligt bättre kännedom om förekomsten av tidigare mindre kända element i ett prov. Detta gäller särskilt många spårmetaller som tidigare inte använts i tekniska tillämpningar i någon större utsträckning, men som idag är nyckelkomponenter i ny teknik (Technology-Critical Elements, Watari m fl., 2020).

Isotopanalyser med ICP–MS

Isotoper är varianter av atomer med samma antal protoner men olika antal neutroner i kärnan. Olika isotoper har därmed olika massa. När ett grundämne deltar i olika processer vid jordytan (kondensation, avdunstning, fotosyntes etc) kommer masskillnaden mellan olika isotoper att leda till att isotoperna koncentreras i varierande grad i olika delar av ett system. Isotoperna får då olika halter i olika delar av ett system, och dessa olika halter mäts som kvoter mellan olika isotoper. Detta kan ge information om ett grundämnes ursprung (källa), och vilka processer som grundämnet deltagit i vid jordytan. Mätningar av isotopkvoter är därför en av de viktigaste metoderna vid spårning av ett ämnes ursprung.

För bestämning av isotopkvoter hos tyngre element (de flesta metaller) används oftast sk multikollektor ICP–MS-teknik (MC–ICPMS). Grundprincipen är densamma som vid haltbestämningen med ICP–MS, dvs provet joniseras i en induktivt kopplad plasma, och jonerna separeras sedan efter massa till laddningsförhållandet i en masspektrometer. För att få tillräcklig precision i bestämningen av isotopkvoterna är analysenheten i ett multikollektor ICP–MS-instrument av en annan konstruktion än i ett konventionellt ICP–MS-instrument. Som namnet indikerar så innehåller detektorhuset i ett multikollektorinstrument upp till nio detektorer där isotoperna detekteras simultant.

Isotopsystemen för bly och strontium har under relativt lång tid använts för att spåra ursprunget av blyföroreningar och olika vattenmassor (Norrström och Knutsson, 2012; Widerlund och Andersson, 2011). Multikollektor ICP–MS-tekniken har idag utvecklats så att även andra isotopsystem kan studeras, t ex bor, kadmium, krom, koppar, kvicksilver, litium och zink (Hogan och Blum, 2003; Weiss m fl., 2008; Pontér m fl., 2016; 2021).

Syre- och väteisotopanalyser med gas–IRMS

Gas–IRMS-tekniken (Gas Isotope Ratio Mass Spectrometry) används för att mäta lättare isotoper som t ex syre, väte, kol och kväve. Tekniken bygger på att provet förgasas och joniseras av en het glödtråd eller i ett elektrostatiskt fält innan kvoterna mellan isotoperna mäts i en masspektrometer. Analyserna utförs idag som rutinanalyser vid ett flertal laboratorier. Syre- och väteisotoper har länge använts i hydrologiska och geokemiska

studier för att spåra vattenmassors ursprung (Clark och Fritz, 1997). I Sverige har dock användningen av dessa isotoper för att spåra råvattenursprung i anslutning till vattentäkter varit begränsad.

Automatisk övervakning

Idag finns system med sensorer och loggers som kontinuerligt mäter vattenkvalitetsparametrar och levererar data online i stort sett i realtid (EHP, 2021). Denna typ av övervakningssystem kan ge en första indikation på en förändring av vattenkvaliteten, och användas för att styra manuell vattenprovtagning för screening- och isotopanalyser.

Ett vattens elektriska konduktivitet (elektriska ledningsförmåga) är ett mått på vattnets innehåll av lösta joner. Detta är en standardparameter som oftast ingår i de automatiska övervakningssystem för vattenkvalitet som finns på marknaden. Förutom elektrisk konduktivitet kan dagens system dessutom mäta ett stort antal andra parametrar, t ex vattennivåer, temperatur, pH, suspenderade partiklar och löst syre (EHP, 2021).

3.2 Tolkningsmetodik

Den tolkningsmetodik som beskrivs här är framför allt inriktad mot att spåra källor för vatten och spridningsvägar för föroreningar vid dricksvattentäkter (tabell 3.1).

Dessa tre kriterier bör vara uppfyllda för att ett element ska vara lämpligt att använda som indikator (tracer) för ett vattens ursprung:

- Elementhalterna eller elementets isotopsignaler från olika källor ska vara tydligt skilda från varandra.
- Elementet bör vara konservativt, dvs elementet deltar inte i kemiska / biologiska reaktioner som ändrar halten av elementet från källan till provtagningsspunkten. Elementhalterna påverkas endast av blandning av olika vattenmassor (spädning) eller avdunstning.
- Elementet ska vara analystekniskt lämpligt att använda, och kunna mätas med god noggrannhet och precision.

Genom att kombinera analyser av element och isotoper ökar tolkningsmöjligheterna, särskilt med ett stort antal element från screeninganalyser.

3.2.1 Kvalitativ tolkning av data

Elementkvoter

Koncentrationerna av element i grund- och ytvatten är ofta påverkade av utspädning (t ex av regnvatten) eller avdunstning. Dessa processer orsakar då haltvariationer som inte är kopplade till ursprungskällans sammansättning. Ett sätt att undvika denna typ av haltvariationer är att arbeta med elementkvoter i vattenanalyser. Grundprincipen vid tolkningen av dessa data är att kvoten mellan två element inte påverkas av spädning / avdunstning (Ingri m fl., 2005). Detta förutsätter dock att halterna i t ex regnvatten är låga för de element som används i kvotberäkningen.

Elementkvoter kan i många fall användas som kvalitativa indikatorer för olika vattentyper. Detta gäller t ex vid saltvatteninträngning i råvattentäkter, där havsvattenkomponentens kvoter mellan Na/Mg och Ca/Mg i regel klart avviker från motsvarande kvoter i sötvatten. Tabell 3.2 visar Mg-kvoterna för Luleälven och havsvatten, där även procentandelar av Mg-kvoterna i vattnen redovisas. Dessa värden kan användas vid tolkningen av data i triangeldiagram. Ökande Na/Mg- kvot och minskande Sr/Mg- och Ca/Mg- kvoter kan tolkas som intrång av havsvatten (se avsnitt 6.2).

Mg-kvoter	Luleälven	Havsvatten	Luleälven [%]	Havsvatten [%]
Sr/Mg*100	1,83	0,62	22	7
Na/Mg	1,88	8,40	23	90
Ca/Mg	4,54	0,32	55	3

Tabell 3.2

Magnesiumkvoter för Luleälven och havsvatten (havsvattendata från Millero, 2008).

Ceriumanomali

Cerium (Ce) är ett redoxelement och påverkas därmed av tillgången på syre under sin transport i grund- och ytvatten. Oxidation av jonen Ce^{3+} till Ce^{4+} , vilket framför allt sker i oxiderade ytvatten, leder normalt till minskande halter av cerium i ett vatten eftersom Ce^{4+} jonen har en tendens att fastläggas på fasta mineralytor. Genom att beräkna den s k ceriumanomalin fås en indirekt indikation på om ett vatten har varit utsatt för oxiderande förhållanden (ytvatten), eller om vattnet domineras av en grundvattenkomponent som transporterats i reducerande förhållanden. Ceriumanomalin beräknas enligt ekvationen:

$$Ce - anomaly = \frac{3 \cdot \frac{Ce}{Ce_{morän}}}{2 \cdot \frac{La}{La_{morän}} + \frac{Nd}{Nd_{morän}}} \quad (1)$$

där Ce, La och Nd är halterna av cerium, lantan och neodym i det aktuella vattnet, och $Ce_{morän}$, $La_{morän}$ och $Nd_{morän}$ är halterna av dessa element i lokalt moränmaterial (Ingri m fl, 2000). Cerium, lantan och neodym ingår normalt inte i de analyspaket som används för rutinanalyser av vatten, utan kräver en s k screeninganalys.

Isotoper

Isotopanalyser och tolkningen av dessa är en av de mest användbara metoderna för att få information om biogeokemiska processer och för att kunna spåra ursprunget för olika vattenmassor (Kendall och Caldwell, 1998; Wiederhold, 2015). Stabila isotoper av lätta element (H, C, O, N, S) har länge använts i miljögeokemiska studier av grundämnens transport och cirkulation i mark och vatten. Vid spårning av vattenmassors ursprung har traditionellt syre- och väteisotoper använts (Clark och Fritz, 1997), men användningen av isotoper för tyngre element (metaller) ökar i takt med att analysteknikerna för dessa system utvecklas (Wiederhold, 2015). Isotoper kan användas vid spårning av en vattenmassas ursprung eftersom:

- Vatten med olika ursprung och med olika flödesvägar ofta har skilda isotopsignaturer.
- I motsats till koncentrationerna av element är ofta elementens isotopsammansättning konservativ, dvs isotopsammansättningen ändras inte märkbart om elementet deltar i en kemisk/biologisk reaktion.
- De förändringar i isotopsammansättningen som trots allt förekommer är ofta systematiska och kvantifierbara, och kan därför användas för att identifiera de reaktioner som orsakat förändringarna.
- Om signalen från en isotopmässigt distinkt källa uppmäts i ett vatten är detta en tydlig indikation på ett hydrologiskt samband mellan vattnet och denna källa.

Syre och väteisotoper – Syre har tre stabila isotoper (^{16}O , ^{17}O och ^{18}O), och väte har två stabila isotoper (1H och deuterium, 2H). I vattenmolekyler (H_2O) förekommer dessa isotoper oftast i tre olika kombinationer ($^1H_2^{16}O$, $^2H_2^{18}O$ och $^1H_2^{18}O$). De olika isotoperna av syre och väte har olika massa, och vattenmolekyler med olika kombinationer av dessa isotoper får då också olika massa. Vattenmolekyler med olika massa påverkas (fraktioneras) olika mycket av processer i den hydrologiska cykeln, t ex kondensation och avdunstning. Olika vattenmassor får därmed olika isotopsammansättning som kan indikera vattnets ursprung, eller vilka processer som påverkat vattnets sammansättning.

Isotopsammansättningen för syre uttrycks som ett $\delta^{18}\text{O}$ -värde i förhållande till en isotopstandard enligt:

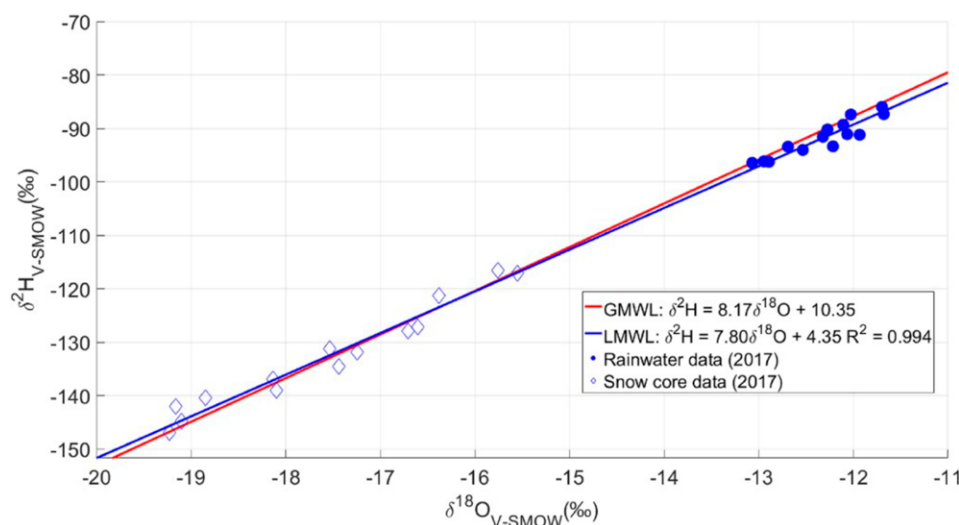
$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{prov}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000 \text{ [‰]} \quad (2)$$

I ekvationen representerar R kvoten mellan isotoperna ^{18}O och ^{16}O . För väteisotoperna skrivs motsvarande ekvation:

$$\delta^2\text{H} = \frac{R_{\text{prov}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000 \text{ [‰]} \quad (3)$$

där R är kvoten mellan isotoperna ^2H och ^1H .

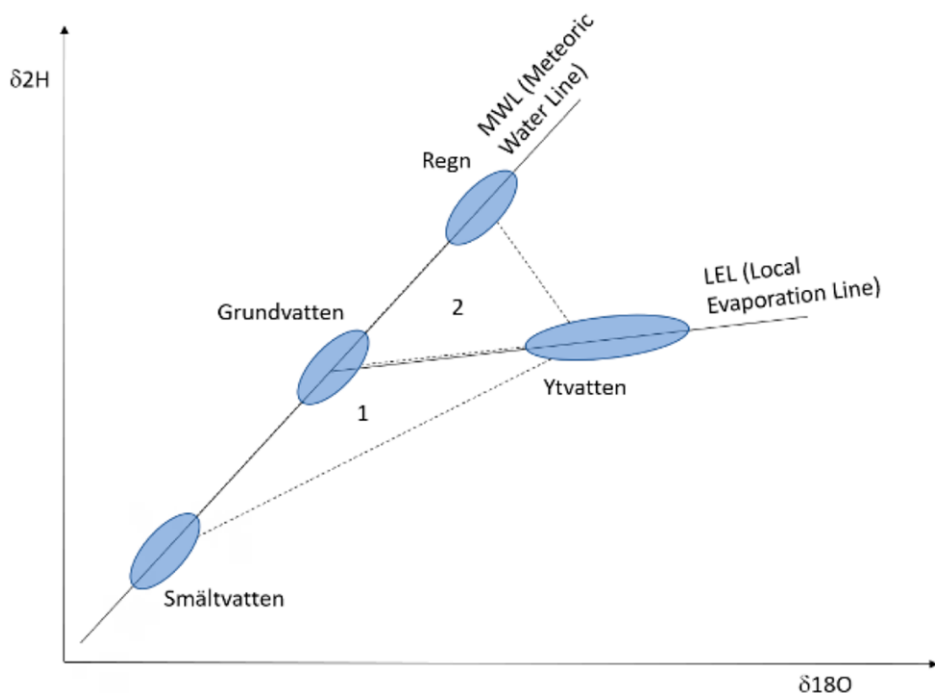
För syre och väte används havsvatten (Standard Mean Ocean Water, SMOW) som isotopstandard. För syre- och väteisotoper i nederbörd finns ett globalt samband som kan skrivas $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$. Detta är ekvationen för en rät linje som kallas Global Meteoric Water Line (GMWL), som beskriver det globala sambandet mellan syre- och väteisotopernas sammansättning i nederbörden (figur 3.1). Eventuella avvikelser från GMWL kan ge information om vilka processer som påverkat ett vatten, t.ex. avdunstning. Isotopsammansättningen i den lokala nederbörden i ett område kan beskrivas med en Local Meteoric Water Line (LMWL) (figur 3.1).



Figur 3.1

Den globala medelsammansättningen för syre- och väteisotoper i nederbörd (Global Meteoric Water Line, GMWL) och sammansättningen för syre- och väteisotoper i lokal nederbörd i norra Sverige (Local Meteoric Water Line, LMWL) (Paulsson och Widerlund, 2020).

Figur 3.2 är en förenklad visualisering av hur data från syre- och väteisotoper kan tolkas kvalitativt. Olika typer av vatten har olika syre- och väteisotopsammansättning. Dessa är förenklat beskrivna i figur 3.2 med fyra grupper: grundvatten, ytvatten, regn och smältvatten. Genom att sammanbinda grupperna med linjer bildas trianglarna 1 och 2, som är användbara för att lokalisera olika vattens ursprung. Grundvatten som påverkas av ytvatteninfiltration och regn plottar i triangel 2, medan grundvatten påverkat av ytvatteninfiltration och smältvatten plottar i triangel 1. Diagram av den typ som visas i figur 3.2 kan därmed användas inte bara för att indikera om ett vatten tillhör någon av de fyra ändkomponenterna, utan även om vattnet är en blandning av flera ändkomponenter.



Figur 3.2

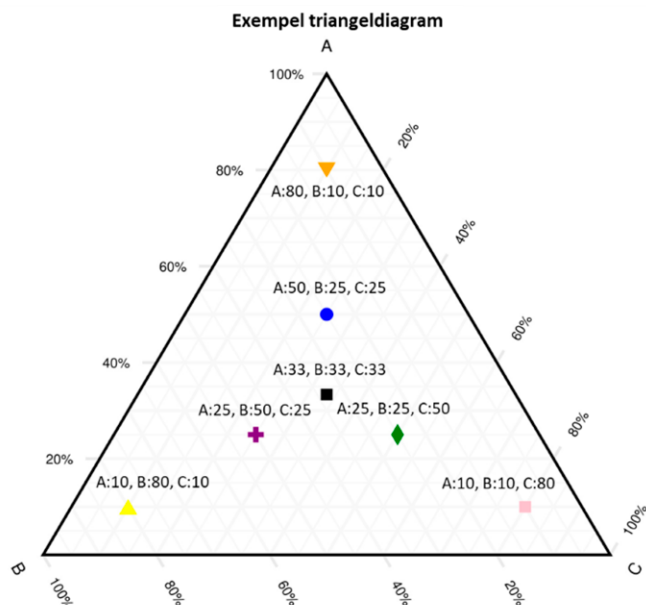
Kvalitativ tolkning av syre- och väteisotopdata i ett system med de fyra ändkomponenterna grundvatten, ytvatten, regn och smältvatten.

Metallisotoper – Utvecklingen av ICP–MS-tekniken har gett möjligheter att mäta isotopsammansättningen för ett stort antal metaller. Isotopsammansättningen för t ex bly, strontium och uran har kunnat mätas under relativt lång tid, och har använts för att spåra källor i många studier (Aggarwal m fl., 2008; Komarek m fl., 2008; Norrström och Knutsson, 2012; Paces och Wurster, 2014).

Under senare år har allt fler stabila isotoper kunnat mätas med ICP–MS-tekniken, och användningen av dessa isotopsystem för att spåra föroreningskällor och föroreningars transportvägar ökar. Som exempel på dessa icke-traditionella isotopsystem kan nämnas kadmium, krom, koppar, kvicksilver, osmium, selen och zink (Rodushkin m fl., 2007; Weiss m fl., 2008, Wiederhold, 2015; Pontér m fl., 2016; 2021).

Diagram för visualisering av data

Triangeldiagram av typen Piper- och Durov-diagram har traditionellt använts för att visualisera den kemiska sammansättningen för olika vattentyper (Ravikumar m fl., 2015). I ett triangeldiagram kan tre olika komponenter plottas i två dimensioner, och en punkt i ett triangeldiagram beskriver de relativa proportionerna (a, b, c) mellan tre ändkomponenter (A, B, C). Diagrammet visar den procentuella fördelningen mellan komponenterna, där $a + b + c = 100\%$ (figur 3.3). Förutom att visa data för tre komponenter på ett överskådligt sätt är diagrammet ett utmärkt verktyg för att visa på trender och avvikelser från trender i vattenkvalitetsdata. I denna studie har diagramtypen använts för att visualisera den kemiska sammansättningen och trender i vattendata baserade på elementkvoter och isotopdata.



Figur 3.3

Förtydligande illustration för hur triangelndiagram ska tolkas, där talen i diagrammet representerar procentandelarna för komponenterna A, B och C.

3.2.2 Kvantitativ tolkning av data

Elementhalter: blandning av vattenmassor och avdunstning

Teorin för två- och trekomponentsblandningar av olika vattenmassor samt koncentration av element orsakad av avdunstning är väl känd och finns beskriven t ex i Faure (1991). Om antalet källor är begränsade till två eller tre, och källornas koncentrationer är kända kan de olika källornas proportioner i en blandning beräknas. Detta förutsätter dock att elementet är konservativt, dvs elementet deltar inte i kemiska / biologiska reaktioner som ändrar halten av elementet från källan till provtagningspunkten. Vid avdunstning påverkas inte kvoterna mellan olika element, och om koncentrationerna före och efter avdunstning är kända kan en koncentrationsfaktor beräknas.

När tre komponenter blandas i olika proportioner kommer blandningen att ligga inom en blandningstriangel, vars hörn representeras av de tre komponenterna. Detta är samma typ av blandning som plottas i ett sk triangelndiagram (figur 3.3). När sammansättningen av de tre ändkomponenterna är känd kan dock proportionerna av de tre komponenterna beräknas.

Isotoper: blandning av vattenmassor

Vid blandning av olika vattenmassor blandas isotoper konservativt, dvs isotopsammansättningen i blandningen är intermediär mellan isotopsammansättningen av de ändkomponenter som ingår i blandningen. Isotoper kan därför principiellt utnyttjas på samma sätt som andra konservativa element vid blandningsberäkningar (Kendall och Caldwell, 1998). Om två vattendrag med vattenflöden Q_1 och Q_2 och syreisotopsammansättningen $\delta^{18}O_1$ och $\delta^{18}O_2$ blandas, kan blandningens isotopsammansättning i det kombinerade flödet Q_T beräknas enligt:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad (4)$$

$$\delta^{18}O_T \times Q_T = \delta^{18}O_1 \times Q_1 + \delta^{18}O_2 \times Q_2 \quad (5)$$

Som ett annat exempel kan nämnas att blandningen av två vatten med kända syre- ($\delta^{18}O$) och väteisotopsammansättningar (δ^2H) kommer att falla på en rät linje mellan dessa två ändkomponenter i ett $\delta^{18}O - \delta^2H$ -diagram (figur 3.1).

I många fall plottar isotopblandningar dock inte längs räta linjer i ett X-Y-diagram, utan bildar istället hyperboliska kurvor. Detta är fallet om ändkomponenterna i ett tvåkomponentsystem har olika koncentrationer (X) och olika isotopkvoter (Y) av elementet. Denna typ av blandningsbeteende ses t ex för strontiumisotoper. Hyperboliska blandningskurvor kan dock transformeras till räta linjer om koncentrationen C plottas som $1/C$ i diagrammet.

IsoSource

IsoSource är en Microsoft Visual BasicTM-programvara som är fritt nedladdningsbar från U S Geological Surveys hemsida (USGS, 2020). Programmet beräknar ett intervall för en källas proportionella bidrag till en blandning baserat på stabila isotopanalyser när antalet källor är för stort för att ge en unik lösning till en blandningsmodell (antalet källor > antalet isotopsystem + 1). Programmet kan också användas för andra icke-isotopiska spårämnen, t ex koncentrationer av spårämnen. IsoSource har bl a använts för att beräkna bidraget från olika källor i avfall, människors och djurs diet, samt vid spårning av ett vattens ursprung och källor för kol i organiskt material i sediment (Phillipps m fl., 2005; Widerlund m fl., 2014; USGS, 2020). Användning av programmet kräver kännedom om isotopsammansättningen för blandningen och för de källor som ingår i blandningen.

4 Fältområde

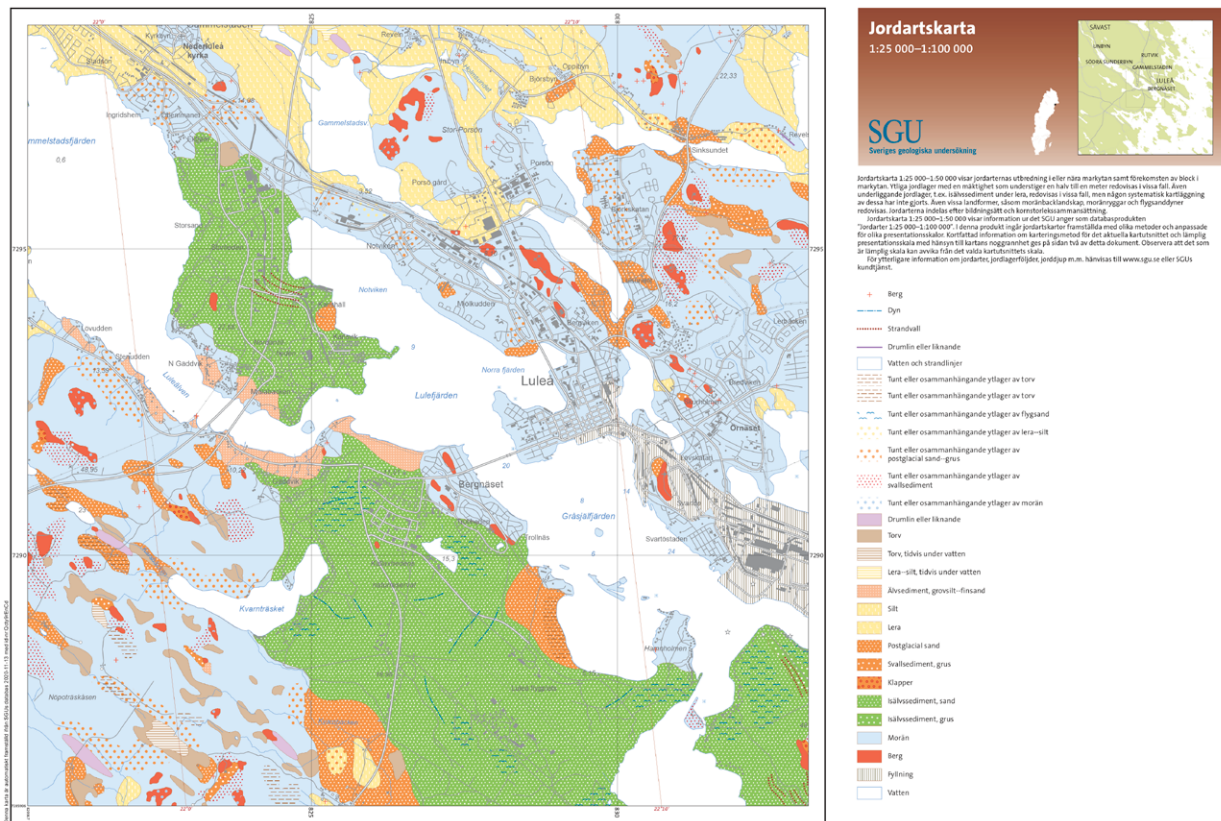
Denna studie genomfördes i området mellan Luleå kommuns huvudvattentäkt vid Gäddvik och Kallax flygplats (figur 4.1). Vid huvudvattentäkten tillämpas konstgjord infiltration, där vatten från Luleälven får infiltrera ner till grundvattenmagasinet i en rullstensås.



Figur 4.1

Flygbild över fältområdet vid Gäddvik med markerade provpunkter (Eniro).

Isälvsediment och morän är dominerande jordarter i området, där huvudvattentäkten och en potentiell reservvattentäkt är lokaliserade i isälvsediment norr respektive söder om Luleälven (figur 4.2). Samtliga naturliga sjöar och vattenfyllda grustag är belägna i isälvsediment, med undantag för Kvarnträsket som i väster underlagras av morän och i öster av isälvsediment. Baserat på grundvattnets strömningsriktning kan det observeras att ytvatten från både Kvarnträsket och Höträsket bör kunna infiltrera ner i grundvattnet och röra sig mot både reservvattentäkten och huvudvattentäkten. En utförligare beskrivning av fältområdet ges i Eriksson Solander (2020).



Figur 4.2

Jordartskarta över fältområdet vid Luleå kommuns reservvattentäkt (SGU Kartvisare 2020).

5 Metoder

5.1 Vattenprovtagning

Provpunkter och provtagningsdatum

Figur 4.1 visar de provpunkter i fältområdet vid Gäddvik där olika typer av vatten har provtagits. I tabell 5.1 redovisas provtagningsdatum för respektive provpunkt. Hela datasetet omfattar totalt 138 prover.

Provtyp och provpunkt ¹	Provtagningsdatum	
	2018	2019
Vattentäkter Luleå kommuns huvudvattentäkt, Gäddvik Luleå kommuns reservvattentäkt, Gäddvik	Juni, sept., okt., nov. Okt., nov.	April, juni, sept. April, juni, sept.
Lule älv Luleå kommuns huvudvattentäkt, Gäddvik	Sept., okt., nov.	April, juni, sept.
Sjöar Kvarnträsket (KT) Höträsket (HT)	Sept., okt., nov. Sept., okt., nov.	April, juni, sept. April, juni, sept.
Bäck KT, bäck	Sept., okt., nov.	April, juni, sept.
Vattenfyllda grustag (grundvatten) Q1 Q2 Q3	Sept., okt., nov. Sept., okt., nov. Sept., okt., nov.	April, juni, sept. April, juni, sept. April, juni, sept.
Grundvatten Grundvattenrör 1–6, 11, K10, K11 Hus 2, 3 (privat brunn) KT, hus (privat brunn) Kalkkälla	Sept., okt., nov. Juni, sept. Sept., okt., nov. Juni, sept., okt., nov.	Juni Juni April, juni, sept. April, juni, sept.

¹Provpunkternas lägen redovisas i figur 4.1

Provtagning för screeninganalys och isotopanalys

Prov filtrerades i fält genom filter med porstorlek 0.45 µm för att undvika förekomst av partiklar i provet. Filtrerat prov uppsamlades i provkärn kontrollerade och godkända av laboratoriet (ALS Scandinavia AB). För att undvika kontaminering av provet användes engångshandskar vid provtagning. Vattenproven filtrerades inom 48 timmar efter provtagning (Viklander m fl., 2019).

Provtagning för syre- och väteisotoper

Ofiltrerat vattenprov togs i 30 mL glasflaska med tätslutande kork. För att undvika avdunstning från provet fylldes flaskan helt och förvarades i kyl fram till analys.

5.2 Kemiska analysmetoder

Screening- och isotopanalyser utfördes vid ALS Scandinavia AB i Luleå (ALS, 2021). Screeninganalyser innebär att ca 70 grundämnen analyseras jämfört med ca 25 grundämnen i de standardanalyser som normalt utförs. Analyser av syre- och väteisotoper utfördes vid Iso-Analytical, Crewe, UK (Iso-Analytical, 2021) och Sveriges Lantbruksuniversitet i Umeå (SLU, 2021). Analysmetoder och referenser till metodbeskrivningar redovisas i tabell 5.2.

Tabell 5.1

Provtyper, provpunkter och provtagningsdatum vid undersökningsområdet vid Gäddvik.

Analyslaboratorium	Analysmetod	Referens
ALS Scandinavia AB	Screeninganalys med ICP-MS Metod: SS-EN ISO-17294-2	ALS (2021)
Iso-Analytical	Syre- och väteisotoper Metod: IRMS ¹	Iso-Analytical (2021)
Sveriges Lantbruksuniversitet	Syre- och väteisotoper Metod: Laserspektrometri	SLU (2021)

¹IRMS: Isotope Ratio Mass Spectrometry

Tabell 5.2

Analysmetoder och referenser till metodbeskrivningar för analysmetoder.

5.3 Tolkningsmetoder

Excel har använts för analyseringen av datasetet som skapats från provtagningen i området vid Luleå kommuns reservvattentäkt. Inledningsvis plottades en stor mängd grafer för flertalet element från samtliga provpunkter. Graferna användes för att se trender mellan elementen, säsongsskillnader och likheter mellan provpunkter baserat på kunskapen kring hur elementen beter sig i de olika geokemiska miljöerna som provtagits. Baserat på plottningen av översiktliga grafer valdes de provpunkter och element som bedömdes vara mest lämpade för fortsatt analys. Halter för utvalda element plottades från flertalet provpunkter över provtagningsperioden för att ge en bild över säsongsvariationen och hur elementen skiljer sig åt över tid och mellan provpunkter. En mer utförlig beskrivning av datasetet återfinns i Eriksson Solander (2020).

5.3.1 Magnesiumnormalisering

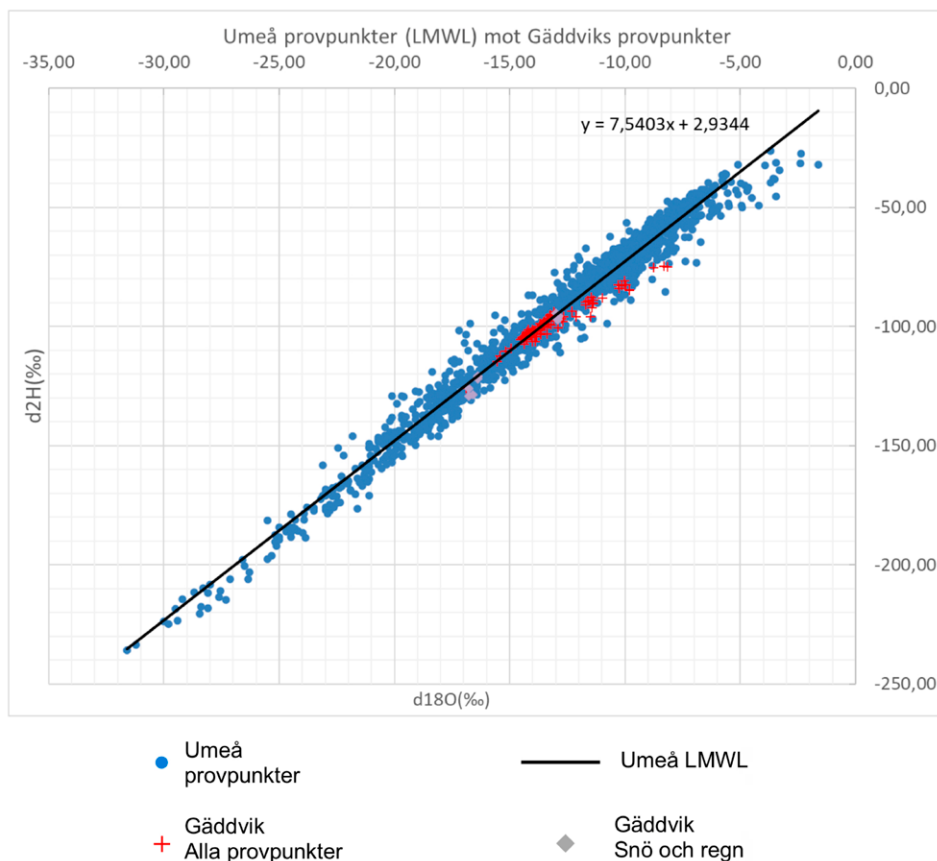
Magnesiumnormalisering är ett sätt att arbeta med elementkvoter (Ingri m fl., 2005). För att minimera påverkan av utspädningseffekter plottas grafer med magnesiumkvoter, där magnesium (Mg) antas vara konservativt och inte heller påverkas av antropogena utsläpp. För att fördjupa tolkningen och bygga en bredare förståelse kan Mg-kvoter plottas tillsammans med data för syre- och väteisotoper och cerumanomalier i triangeldiagram.

5.3.2 Syre- och väteisotoper

Syre- och väteisotopdata från Gäddviksområdet plottades tillsammans med ett stort dataset för lokala syre- och väteisotopdata från norra Sverige (Local Meteoric Water Line, LMWL), plottad med data från SLU (2019). Detta visar hur väl data från provtagningsområdet vid Gäddvik ansluter till den lokala syre- och väteisotopsammansättningen i nederbörd, och om eventuella avvikelser finns (figur 5.1). Vatten i sjöar som har påverkats av avdunstning visar t ex en avvikelse från LMWL. Avvikelsen från LMWL som orsakas av avdunstning (sk line-conditioned excess, lc-excess) kan beräknas med ekvation (6), där a och b är konstanter från LMWL. Standardavvikelsen S beräknas enligt ekvation (7). Punkter som plottar under LMWL får negativa värden och punkter som plottar ovanför linjen får positiva värden för lc-excess. Standardavvikelsen S beräknas utifrån osäkerheten i laboratoriemätningarna, som för $\delta^2\text{H}$ är $\pm 1\%$ och för $\delta^{18}\text{O}$ $\pm 0,07\%$. Ekvationerna (6) och (7) är hämtade från U.S. Geological Survey (USGS, 2004).

$$lc-excess = \frac{\delta^2\text{H} - (a \cdot \delta^{18}\text{O}) - b}{S} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{1^2 + (a \cdot 0.07)^2} \quad (7)$$



Figur 5.1

Local Meteoric Water Line (LMWL) med $\delta^{18}\text{O}$ på x-axeln och $\delta^2\text{H}$ på y-axeln. Blå punkter visar data från SLU Umeå (Svartberget dataportal, SLU, (2019). Röda punkter visar samtliga provtagningspunkter från Gäddviksområdet, där punkter som avviker från LMWL är påverkade av avdunstning.

5.3.3 Cerumanomali

Cerumanomali beräknas och plottas för att indikera trender och olikheter mellan olika vattentyper, och indikerar framför allt om vattnet varit utsatt för oxiderande eller reducerande förhållanden. Värdena för cerumanomalin beräknas enligt ekvation (1) (Ingri m. fl., 2000). I ekvation (1) normaliseras koncentrationerna från provtagningsstillfällena med cerium-, lantan- och neodymkoncentrationer i morän (data från Öhlander m. fl., 1996). Enligt ekvation (1) definieras cerumanomalin som positiv vid värden >1 , ingen anomali vid värdet 1, och negativ vid ett värde <1 .

5.3.4 Triangeldiagram

För att öka möjligheterna att kunna skilja mellan olika vattentyper används triangeldiagram, där tre olika element eller parametrar plottas i samma diagram. Samtliga triangeldiagram i rapporten tolkas enligt den princip som illustreras i figur 3.3. Vid skapandet av triangeldiagram plottas procentandelarna av parametrarna som används i diagrammet. Värden för dessa tre procentandelar normaliseras så att summan för de tre punkterna blir 100 %. För att skapa triangeldiagrammen användes en programvara (Ternaryplot, 2020), där data för de olika parametrarna kan användas utan bearbetning då detta sker automatiskt i programmet. För att inte ge en spridningsbild av datapunkter som är kraftigt förskjutna i någon riktning i triangeldiagrammet kan vissa värden multipliceras eller divideras med en konstant. Denna databearbetning är t ex nödvändig vid stora skillnader i koncentrationer mellan olika element.

En normalisering av syre- och väteisotoperna genomförs mot den mest negativa punkten för lc-excessberäkningarna, och dessa nya värden plottas i triangeldiagrammen. Vid normaliseringen blir de nya värdena avståndet mellan punkterna istället för avståndet till LMWL, då avståndet till LMWL kan vara både positivt och negativt. I triangeldiagrammen krävs att alla värden är positiva för att summan av de tre valda parametrarna alltid ska bli 100 %.

6 Resultat och diskussion

Avsnittet 6. Resultat och diskussion är uppdelat i tre delar för att enklare kunna visualisera trender och variationer i graferna som är framtagna ur datasetet från Gäddviksområdet. Resultatet och de använda metoderna diskuteras löpande.

Avsnitt 6.1 redovisar generellt hur isotop- och screeninganalyser använts i Gäddviksområdet. Diskussionen av syre- och väteisotoper belyser hur samtliga provpunkter plottar relativt en Local Meteoric Water Line (LMWL) baserad på Svartberget dataportal (SLU, 2019). I avsnittet redovisas även resultat för ceriumanomalins variation i Gäddviksområdet samt hur bly- och uranisotoper varierar i grundvatten. Mer detaljerade grafer över elementens koncentrationsvariationer i Gäddviksområdet redovisas i Eriksson Solander (2020).

I avsnitt 6.2 redovisas resultatet från analyser som kan indikera ytvattenintrång eller saltvattenintrång i vattentäkterna i Gäddviksområdet. Som exempel visas hur ytvattenintrång från en sjö (Kvarnträsket) i en privat brunn kan spåras med hjälp av elementkvoter, ceriumanomali och syre- och väteisotopdata.

I avsnitt 6.3 diskuteras mer generellt hur triangeldiagram kan användas för att visualisera trender i vattensammansättning och förekomsten av olika vattenkällor i komplexa system.

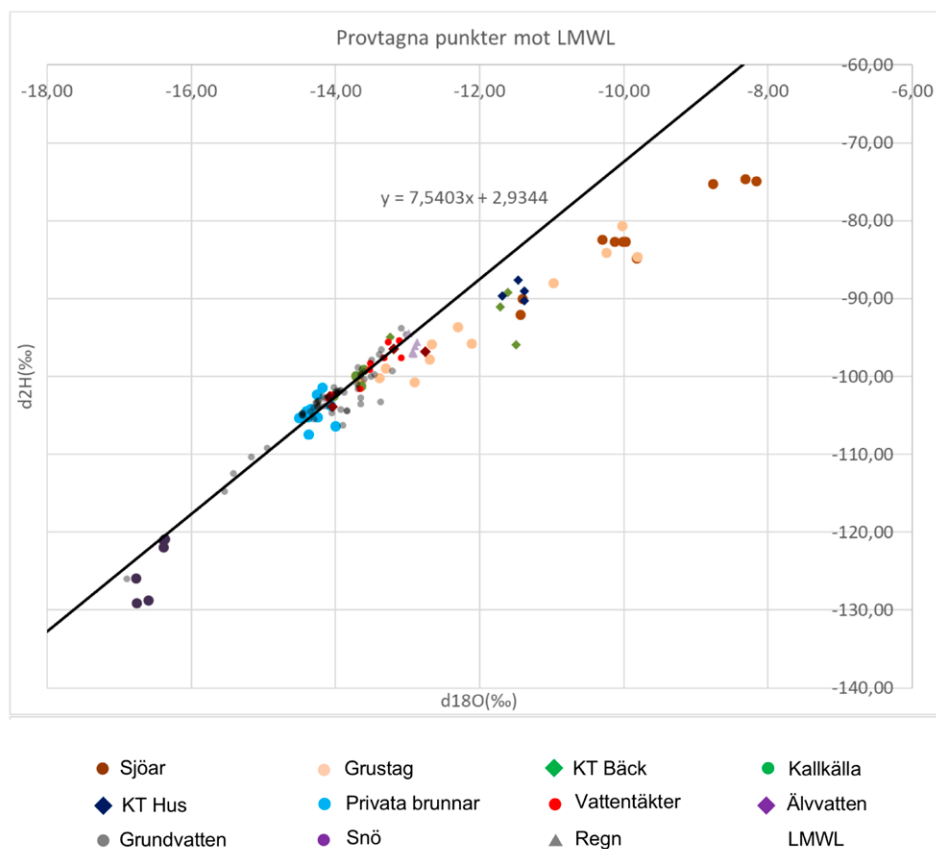
6.1 Isotop- och screeninganalyser för spårning av grundvatten

6.1.1 Syre- och väteisotoper

Figur 6.1 visar att syre- och väteisotopdata från Gäddviksområdet överlappar med syre- och väteisotopdata från Svartberget i Västerbotten som representerar en Local Meteoric Water Line (LMWL). Detta är förväntat då de två områdena har liknande klimat. Figur 6.1 visar att majoriteten av ytvatten, speciellt sjöarna Kvarnträsket och Höträsket på Kallaxheden, plottar under LMWL. Vatten som plottar under LMWL kan ha påverkats av avdunstning (Zachary, 2017), vilket är högst sannolikt för sjöar med stort förhållande mellan yta och volym. Grundvatten på Kallaxheden tenderar att plotta närmare linjen, med punkter som plottar både under och över LMWL. De grundvattenpunkter som plottar nära regn kan antas ha regnvatten som primär vattenkälla.

Även Lule älv visar en viss variation i syre- och väteisotopsammansättningen, där två punkter plottar närmare regn (oktober och november 2018) och två punkter plottar närmare snö (april och juni 2019) (figur 6.1). Dessa variationer kan tolkas som att regnvatten är en viktig källa för älven i oktober och november, medan älvens vatten under vårfloden i april och juni består av en större mängd smältvatten från snö.

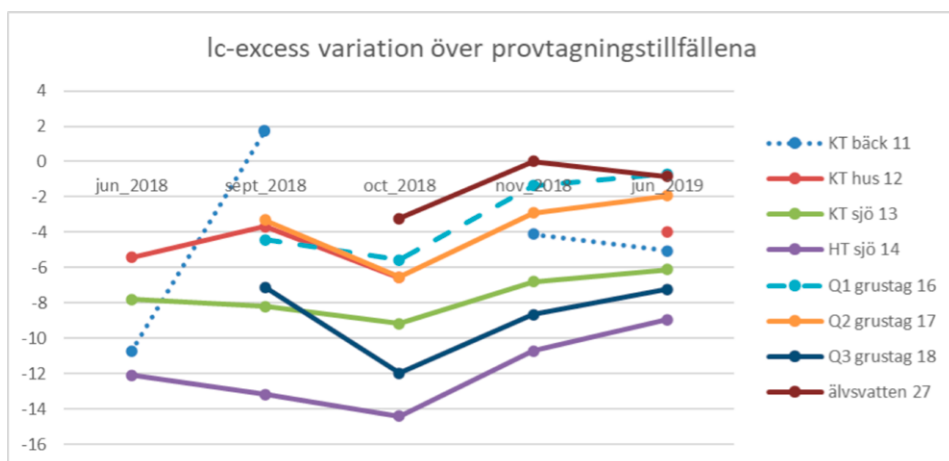
Privata brunnar i Gäddviksområdet plottar längs LMWL, där samtliga fastigheters brunnar plottar i mitten av grundvattenpunkterna med undantag för en privat brunn vid Kvarnträsket (Hus KT, fig. 4.1) vars punkter plottar närmare ytvattnen (figur 6.1). Om tolkningsmodellen i figur 3.2 tillämpas på syre- och väteisotopdata i figur 6.1 indikerar detta att grundvatten i brunnen vid Hus KT är påverkat av infiltration av både regn och ytvatten. Provpunkten Hus KT är lokaliserad nära Kvarnträsket (figur 4.1), och Kvarnträsket är därför en rimlig källa för den ytvatteninfiltration till grundvattnet som indikeras av syre- och väteisotoperna (figur 6.1).



Figur 6.1

Local Meteoric Water Line (LMWL) med $\delta^{18}\text{O}$ på x-axeln och $\delta^2\text{H}$ på y-axeln. LMWL baseras på data från Västerbotten (Svartberget dataportal, SLU, 2019). Diagrammet visar även samtliga provtagningspunkter från Gäddviksområdet.

Avvikelsen från LMWL som orsakas av avdunstning (lc-excess i figur 6.2) visar i huvudsak en liknande trend som $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ -diagrammet i figur 6.1. De negativa lc-excessvärden som observeras i figur 6.2 är de värden som visar störst avvikelse från LMWL och plottar till höger under linjen (figur 6.1). Detta innebär att negativa lc-excessvärden bör vara kopplade till ytvatten som påverkats av avdunstning (naturliga sjöar och sjöarna i grustagen).



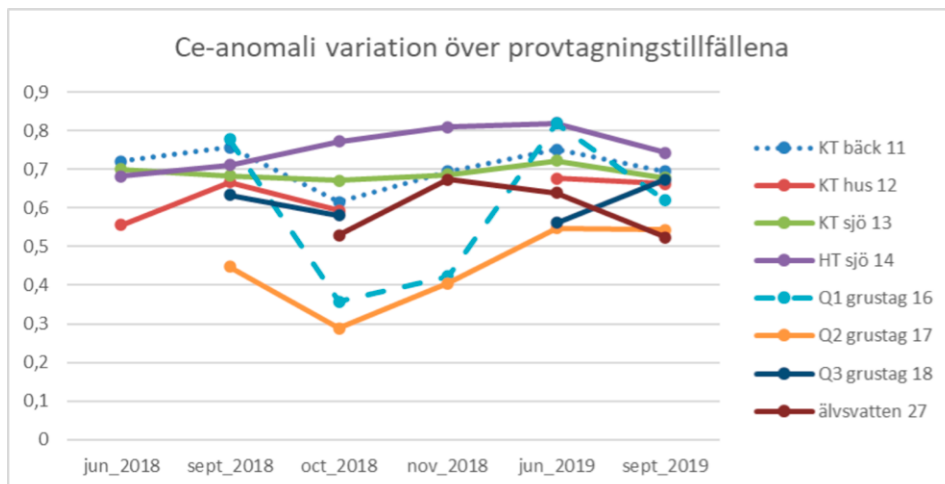
Figur 6.2

lc-excess värden beräknade med ekvation (6) för de olika provtyperna vid samtliga provtagningsstillfällen.

6.1.2 Ceriumanomali

Ceriumanomalin i figur 6.3 visar relativt stabila och liknande trender över provtagningsperioden för majoriteten av provtagningspunkterna. Samtliga ceriumanomalier visar värden under 1 (ca 0,3 till 0,8), och definieras därför som negativa. Sjöarna i grustagen (Q1–Q3) har störst variation där de lägsta värdena observerades vid provtagningsstillfallet

i oktober 2018. Jonen Ce^{4+} adsorberas lättare än Ce^{3+} , och oxidation av Ce^{3+} till Ce^{4+} kan därför resultera i negativa ceriumanomalier i löst fas, medan fasta partiklar i ett vatten visar positiva ceriumanomalier (Pourret m fl., 2008). Tillgången till adsorptionsytor kan därmed vara en orsak till variationerna i figur 6.3. Ceriumanomalierna är relativt stabila över provtagningsperioden vilket indikerar att dessa kan vara en indikator användbar vid klassificering/spårning av olika vattenkällor.

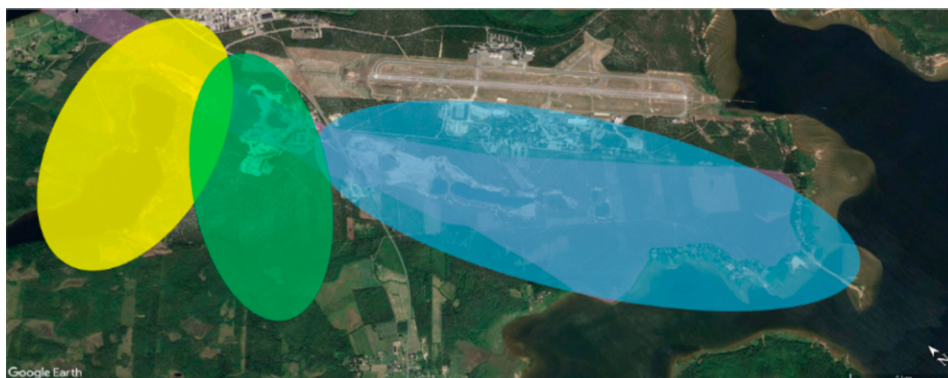


Figur 6.3

Ceriumanomalier beräknade med ekvation (1) för de olika provtyperna vid samtliga provtagningsstillfällena.

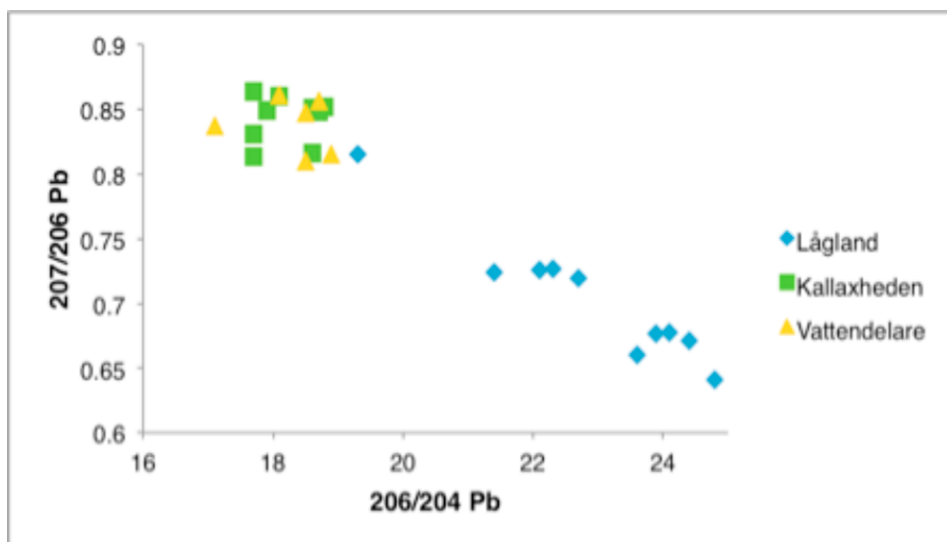
6.1.3 Bly- och uranisotoper

Som ett exempel på hur metallisotoper kan användas för att indikera vatten med olika ursprung visas data för bly- och uranisotoper i grundvatten från Kallaxheden (figur 6.4 och 6.5). Bly- och uranisotoper har studerats under lång tid, och om ändkomponenternas isotopsammansättning är väl känd kan kvantitativa blandningsmodeller konstrueras som visar proportioner av olika vattenkällor i vattentäkter (Norrström och Knutsson, 2012; Paces och Wurster, 2014). Även om ändkomponenternas isotopsammansättning inte är känd kan kvalitativa tolkningar göras angående skillnader i isotopsammansättning mellan olika vattenmassor. De bly- och uranisotopdata som visas i figur 6.5 visar att grundvatten i låglandsområdet har en annan blyisotopsammansättning och därmed troligen en annan källa än grundvatten i de högre belägna delarna av området (Kallaxheden och vattendelaren). Uranisotopdata indikerar även ytterligare en möjlig källa för vatten vid vattendelaren (figur 6.5).



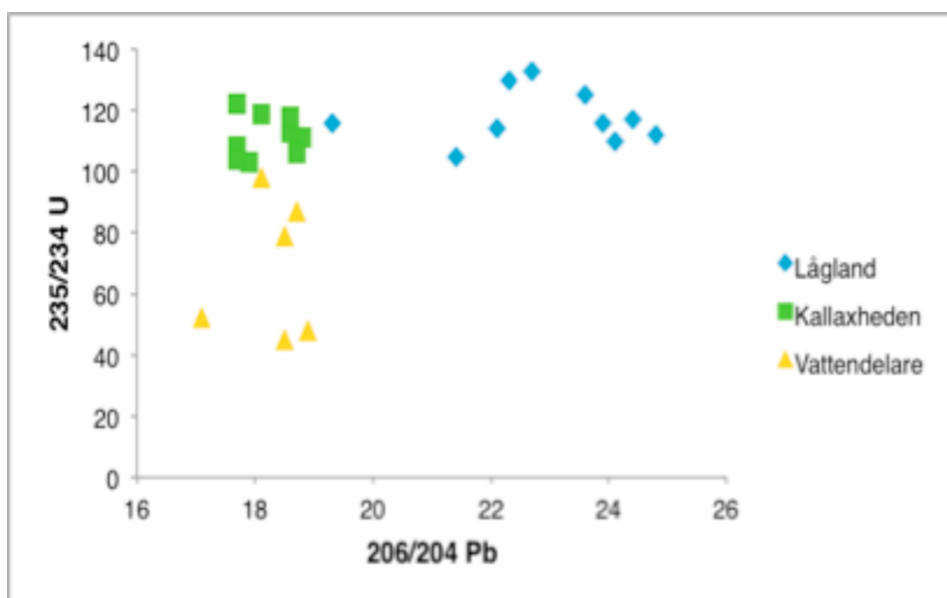
Figur 6.4

Flygbild över Gäddvik – Kallaxheden. Luleås reservvattentäkt vid Gäddvik är belägen vid bildens övre vänstra hörn. Färgade fält indikerar grundvatten med olika isotopsammansättning för bly och uran enligt figur 6.5.



Figur 6.5

Isotopdata för grundvatten från Kallaxheden. Isotopsystemen för bly ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) och uran ($^{235}\text{U}/^{234}\text{U}$) indikerar olika källor för grundvattnet i den nordvästra (gul), centrala (grön) och sydöstra (blå) delen av Kallaxheden.



Tabell 6.1

Årsstatistik för årsmedeltemperatur, solskenstid och nederbörd för Luleå (SMHI, 2020c). Värdet för år 1961–90 är ett medelvärde som representerar normalvärdet för perioden.

6.2 Yt- och havsvattenintrång i vattentäkter

Studien kring reservvattentäkten och vattenverkets huvudvattentäkt kan påvisa om älvvatteninfiltration och eventuell saltvatteninträngning kan indikeras i någon eller båda av vattentäktena. Vissa tidsvariationer i koncentrationer kan ha påverkats av de variationer i väderförhållanden som redovisas i tabell 6.1.

Plats	År	Årsmedeltemperatur (°C)	Solskenstid (timmar)	Nederbörd (mm)
Luleå	2019	2,5	2008	632
Luleå	2018	2,9	2266	523
Luleå	1961–90	1,6	1771	506

De element som har studerats närmare är Sr, Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Pb och U. Strontium, Ca, Na och Mg kan anses vara konservativa, medan Fe och Mn är redoxelement vars

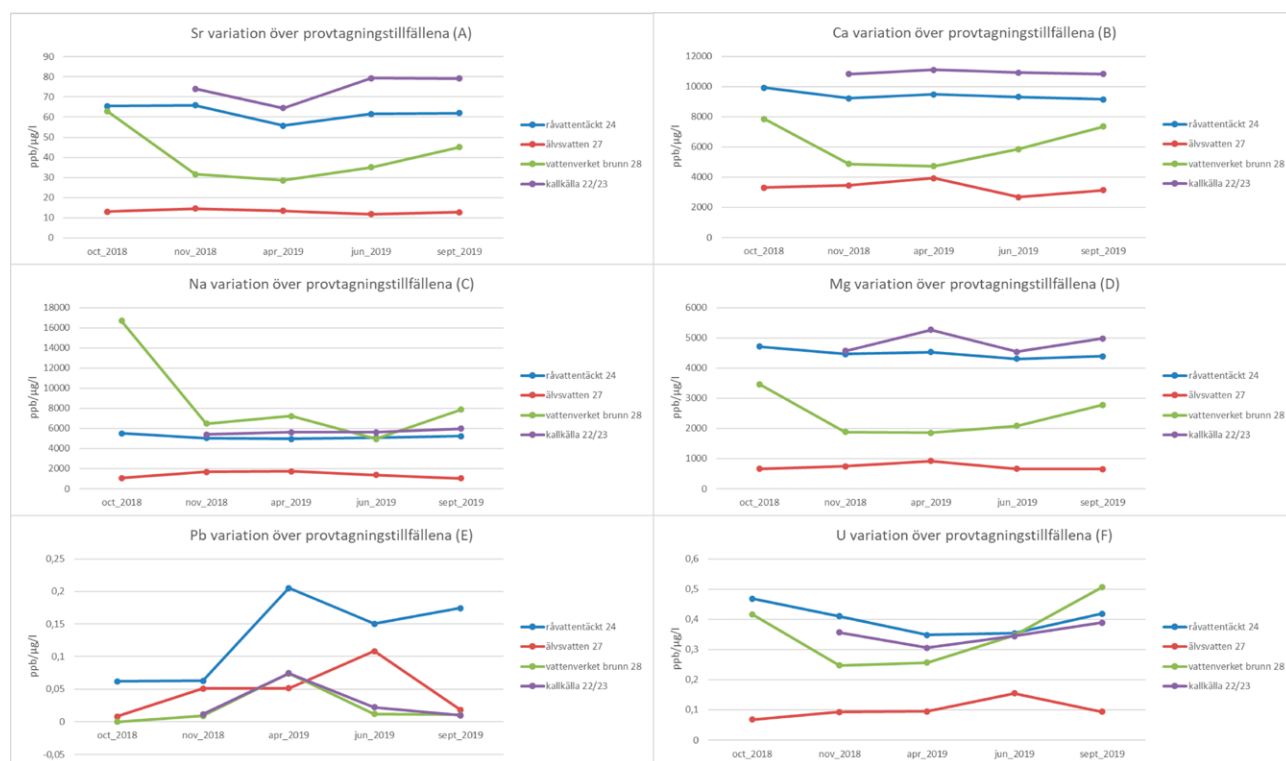
beteende påverkas av geokemiska processer under sin transport i ytvatten och grundvattnen. Järn och Mn påverkar även indirekt mobilitet och transport av andra spårelement, t ex Pb och U, som ofta är associerade med Fe och Mn. Järn och Mn är inte lämpliga som element vid spårning av ett vattens ursprung, men de är utmärkta verktyg för att få förståelse för redoxförhållanden i olika vattentyper. Bly- och urankoncentrationerna kan användas vid karakterisering av vattenkällor, men är inte lämpliga för att spåra ett vattens ursprung. Däremot har uran- och blyisotoper tidigare använts vid spårning av vattenursprung (Norrström och Knutsson, 2012; Paces och Wurster, 2014).

Magnesium används ofta för att normalisera koncentrationer och därigenom minimera påverkan av utspädning vid exempelvis kraftiga regn eller vid snösmältningen. Användning av Mg-kvoter är därmed ett bra komplement till elementkoncentrationer, och ger en bättre förståelse för olika elements tidsvariationer vid varierande flöden.

Sr, Ca, Na och Mg kan anses vara konservativa element, och därmed lämpliga för användning vid spårning/klassificering av olika vattenkällor (figur 6.6 A–D). Bly och U däremot är spårelement som förekommer i låga halter (figur 6.6 E–F). De påverkas t ex av adsorption på Fe och Mn hydroxider och därmed indirekt av redoxkemin för Fe och Mn. Uran är även i sig ett redoxelement som är starkt korrelerat med Fe (Andersson m. fl., 1998). Pb och U är alltså inte konservativa element som påverkas enbart av spädning. Halterna av dessa element är därför inte lämpliga för spårning av källor för olika vatten.

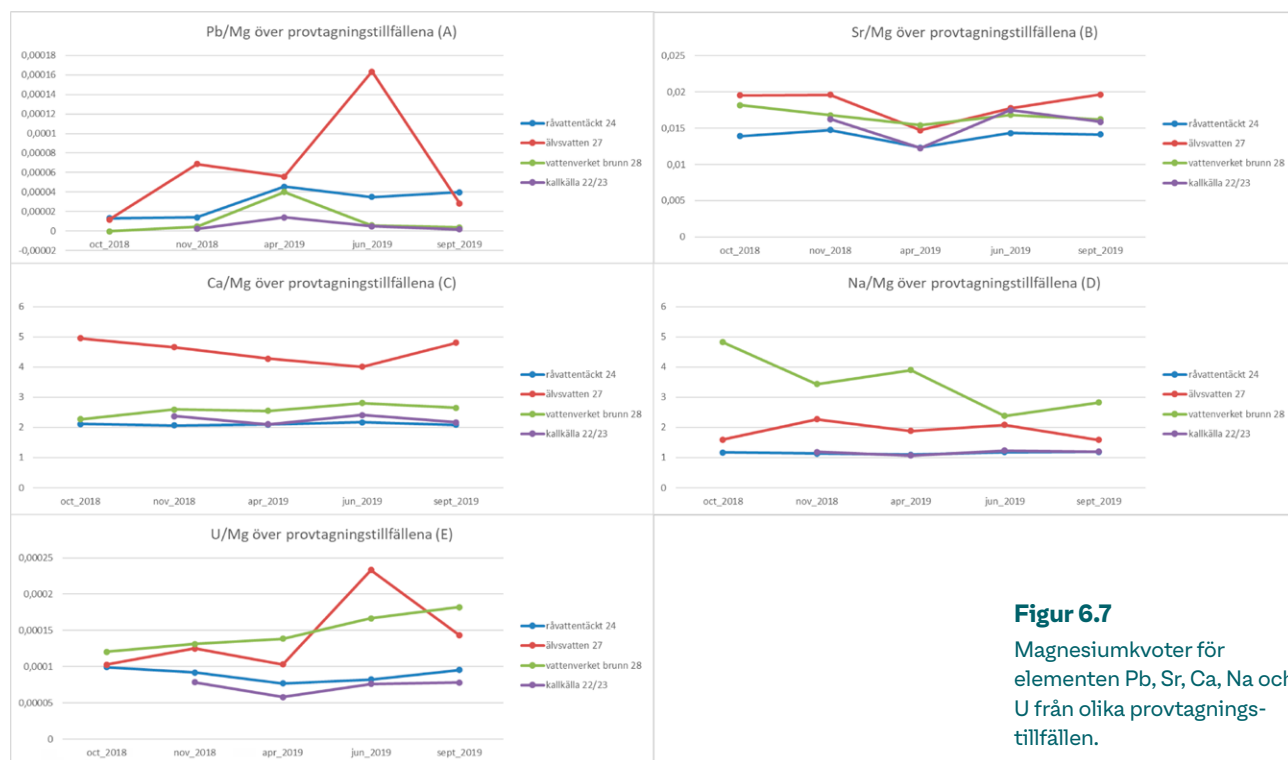
Figur 6.6

Koncentrationer av elementen Sr, Ca, Na, Mg, Pb och U från de olika provtagningsställen.



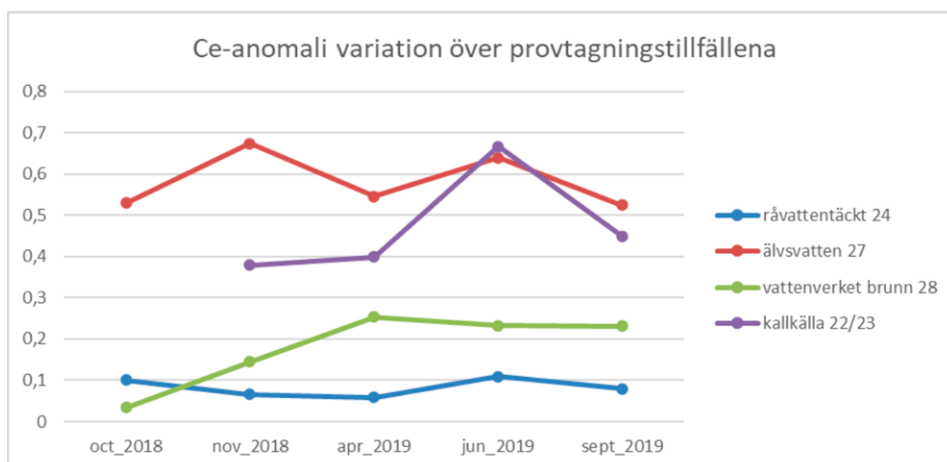
Skillnader mellan provtagningsåren skulle kunna förklaras med att avdunstningen under den varma och soliga sommaren 2018 troligen var högre än normalt (tabell 6.1). Antalet soltimmar 2018 (2266 timmar) är det högsta som registrerats i Luleå sedan solmätningarna började år 1957 (SMHI, 2020c). Antalet soltimmar 2019 (2008 timmar) var även det högt över normalvärdet för 1961–1990 (1771 timmar). Även årsnederbörden vid mätstationen Luleå-Bergnäs skiljer mellan åren, med mindre nederbörd 2018 (523 mm) än 2019 (632 mm). Årsmedeltemperaturen vid Luleå flygplats var även den högre 2018 (2,9°C) jämfört med 2019 (2,5°C). Skillnader i temperatur och nederbörd mellan 2018 och 2019 är en möjlig orsak till att trenderna för provpunkterna varierar mellan åren.

De element/Mg-kvoter som redovisades i tabell 3.2 är potentiellt användbara som indikatorer för havsvattenintrång. I figur 6.7 redovisas Mg-kvoter för de element vars halter redovisades i figur 6.6. I figur 6.7 (B-D) visar reservvattentäkten (råvattentäkt 24) stabila värden med liknande Sr/Mg-, Ca/Mg- och Na/Mg-kvoter som i grundvatten (provpunkten kalkkälla 22/23), vilket inte indikerar något märkbart havsvattenintrång. Vattenverket brunn 28 vid huvudvattentäkten visar en sjunkande Na/Mg-kvot och en något ökande Ca/Mg-kvot över tid, vilket skulle kunna tolkas som en minskande påverkan av relik havsvatten (Lempinen, 2019). I figur 6.7 A och E visar älvvattnets Pb/Mg- och U/Mg-kvoter variationer som med stor sannolikhet är påverkade av variationer i redoxförhållanden och halterna av Fe och Mn.



Figur 6.7
Magnesiumkvoter för elementen Pb, Sr, Ca, Na och U från olika provtagningsstillfällen.

Ceriumanomalin är en parameter som kan användas för att skilja syresatta ytvatten från syrefria grundvatten (avsnitt 3.2.1 och 5.3.3). Figur 6.8 visar en högre ceriumanomali (0,4–0,7) i ytvatten än i de två vattentäktena. Reservvattentäkten (råvattentäkt 24) har en stabilt låg ceriumanomali (ca 0,1), medan vattenverket brunn 28 har en ökande trend vid de tre första provtagningsstillfällena som sedan stabiliseras i intervallet 0,2–0,3. Trenden för ökningen av ceriumanomalin skulle kunna indikera inträngning av älvvatten då älvvattnet har en betydligt högre anomali än de båda vattentäktena (0,5–0,7). Som tidigare nämnts av Pourret m fl. (2008) adsorberas Ce^{4+} starkare än Ce^{3+} . Därmed kan oxidation av Ce resultera i ceriumanomalier <1 i löst fas, medan fasta partiklar i ett vatten visar positiva ceriumanomalier (>1). Vattentäktenas låga värden i intervallet 0,1–0,3 kan då förklaras av det stora antalet kontaktytor / mineraltytor i grundvattenmagasinen, där Ce^{4+} kan adsorberas.

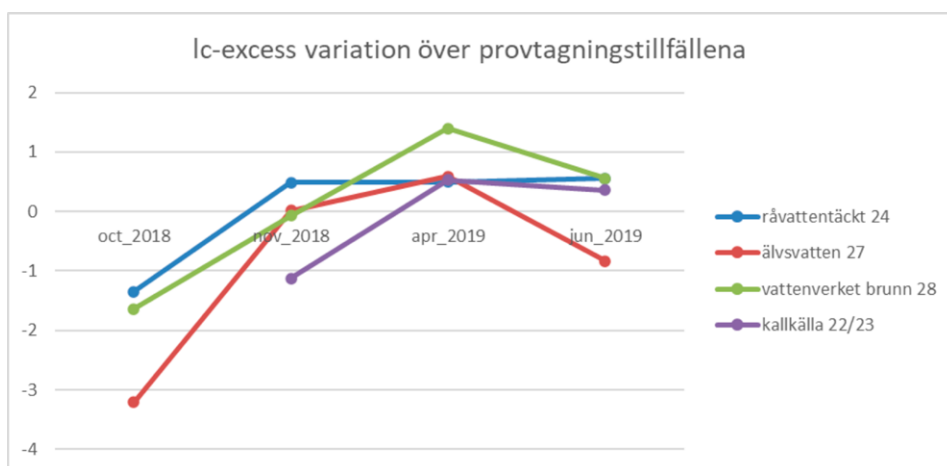


Figur 6.8

Ceriumanomali från de olika provtagningstillfällena beräknad med ekvation (1).

Ett exempel från Kalixälven visar likartade ceriumanomalier, där ceriumanomalin sjönk till ca 0,4 under den istäckta perioden (Ingri m fl., 2000). Detta visar att ceriumanomalins värde är jämförbart i Luleälven och Kalixälven, och troligen kan användas som indikator för att skilja grundvatten från ytvatten.

Figur 6.9 visar variationen i lc-excessvärden för syre- och väteisotoper beräknade från ekvation (6). Provpunkten vattenverket brunn 28 representerar Luleå kommuns huvudvattentäkt vid Gäddvik, och denna provpunkt följer trenden för Luleälvens vatten (älvsvatten 27), med en stigande trend från oktober 2018 till april 2019 följt av en minskning till juni 2019. Reservvattentäkten (råvattentäkt 24) visar en tydlig uppgång från oktober 2018 till november 2018, och förblir sedan stabil. Trenderna i figur 6.9 tyder på att vattenverkets huvudvattentäkt är mer påverkad av älvsvatten än vad reservvattentäkten är. Detta är rimligt eftersom konstgjord infiltration av älvsvatten sker i huvudvattentäkten. Reservvattentäkten är belägen nära Lule älv, och skulle eventuellt kunna påverkas av inträngande älvsvatten vid stora vattenuttag. Ett storskaligt pumptest i reservvattentäkten skulle kunna visa om och i vilken utsträckning älvsvatten skulle tränga in i vattentäkten om denna skulle tas i drift.

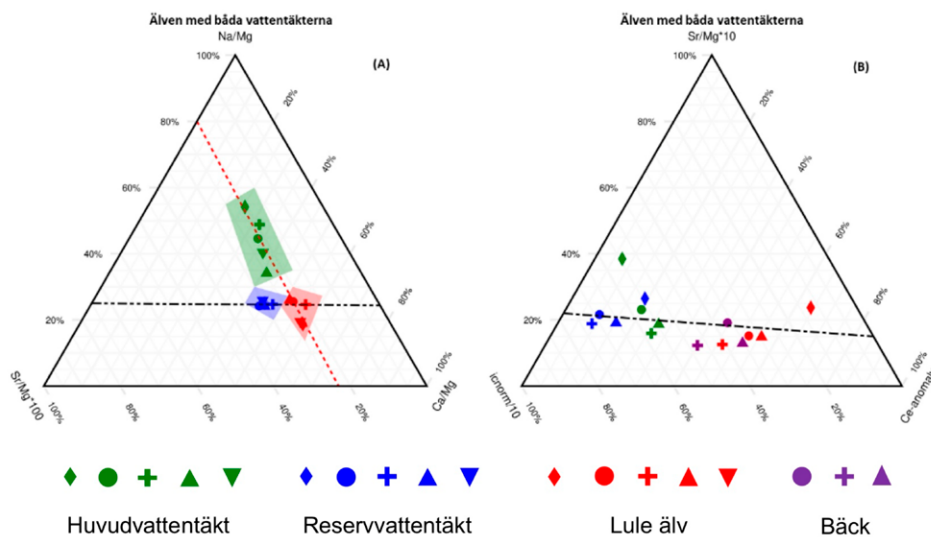


Figur 6.9

Variationen i lc-excessvärden för syre- och väteisotoper vid provtagningstillfällena beräknade med ekvation (6).

I triangeldiagrammet i figur 6.10 A visar vattenverkets huvudvattentäkt stor variation i Na/Mg kvoten, medan reservvattentäktens sammansättning ligger väl koncentrerad nära Lule älv. Trenden mot högre Na/Mg-kvoter kan tolkas som förekomst av relik havsvatten i huvudvattentäkten, vilket också har observerats tidigare (Lempinen, 2019). Figur 6.10 B visar på skillnader mellan grundvatten och ytvatten, där grundvatten (de två vattentäkterna) plottar till vänster i diagrammet med högre värden för $\ln_{\text{norm}}/10$, och ytvatten (Luleälven och en bäck) plottar till höger med högre värden för Ce-anomalin.

Figur 6.10 B skulle potentiellt kunna vara ett sätt att se om ett vatten domineras av grundvatten eller ytvatten, och i vilken utsträckning dessa är blandade i en vattentäkt.



Figur 6.10

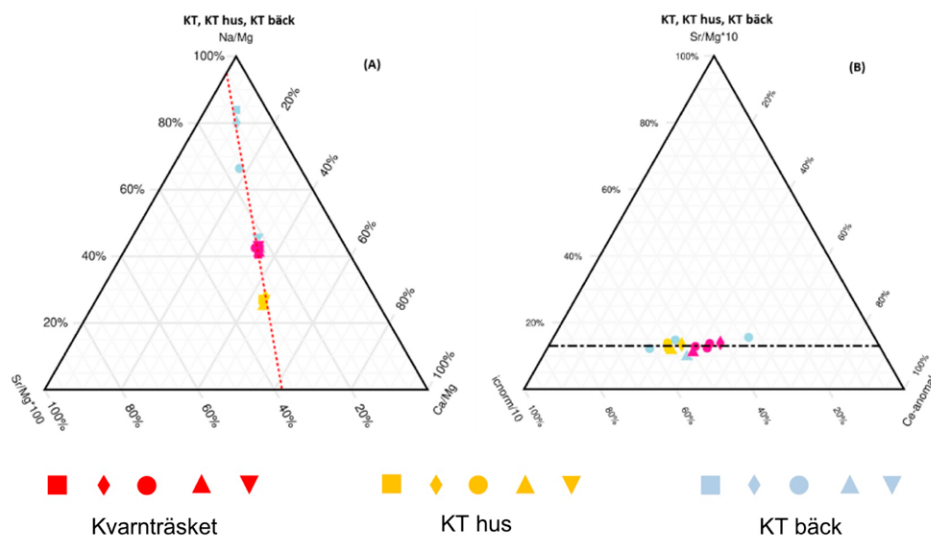
A) Triangeldiagram med parametrarna Na/Mg, Sr/Mg x 100 och Ca/Mg.

B) Triangeldiagram med parametrarna Sr/Mg x 10, 1c-excess normaliseringsvärdet/10 och Ce-anomali. Provtagningsstillfällen: oktober 2018 (diamant), november 2018 (cirkel), april 2019 (kors), juni 2019 (triangel upp) och september 2019 (triangel ner).

6.2.1 Ytvattenintrång i privat brunn – exempel från Kallaxheden

Studien för spårning av ytvattenintrång i grundvatten är fokuserad kring provpunkterna runt Kvarnträsket för att visa om dessa metoder kan indikera ytvatteninfiltration i grundvattnet vid provpunkten KT hus. Provpunkterna som ingår i denna delstudie är Kvarnträsket, KT hus och KT bäck, en bäck belägen söder om Kvarnträsket (figur 4.1). Syre- och väteisotopsammansättningen i figur 6.1 visar också att provpunkten KT hus avviker från övriga privata brunnarna som provtagits, troligen på grund av ytvattenintrång i grundvattnet.

Figur 6.11 A visar stor variation i Na/Mg-kvoten, där provpunkten KT hus visar låga Na/Mg-kvoter och provpunkterna Kvarnträsket och KT bäck visar högre Na/Mg-kvoter. Figur 6.11 B visar ett liknande inbördes förhållande mellan dessa provpunkter, där KT hus har högre 1cnorm/10-värden än Kvarnträsket, och bäcken är extremer åt båda hållen. De stora variationerna för KT bäck i båda triangeldiagrammen torde främst bero på den varma sommaren 2018 som nämnts tidigare i avsnitt 6.2. Den höga avdunstningen bör vara anledningen till att grundvatten är mer representerat i bäcken på grund av det tillsynes låga vattenbidraget från Kvarnträsket.



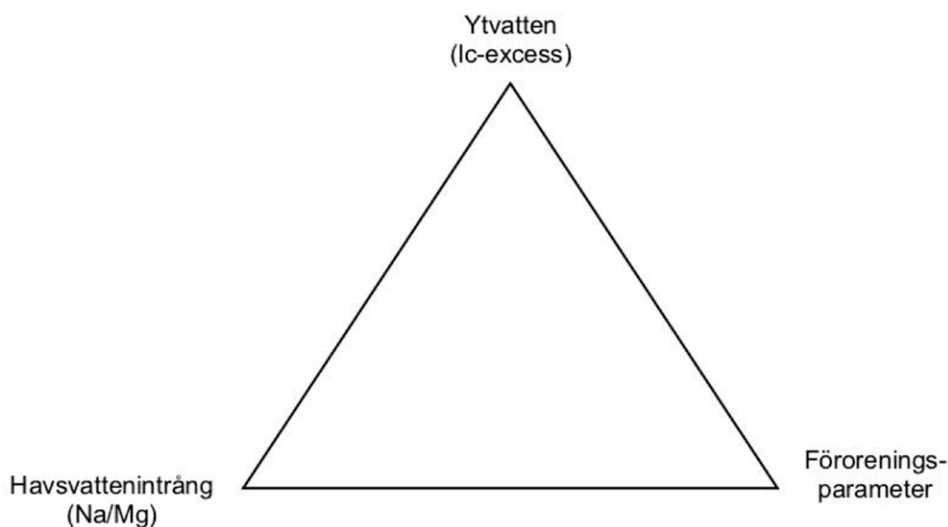
Figur 6.11

A) Triangeldiagram med parametrarna Na/Mg, Sr/Mg x 100 och Ca/Mg.

B) Triangeldiagram med parametrarna Sr/Mg x 10, 1c-excess normaliseringsvärdet/10 och Ce-anomali. Provtagningsstillfällen: september 2018 (kvadrat), oktober 2018 (diamant), november 2018 (cirkel), juni 2019 (triangel upp) och september 2019 (triangel ner).

6.3 Datavisualisering i triangelndiagram – generella exempel

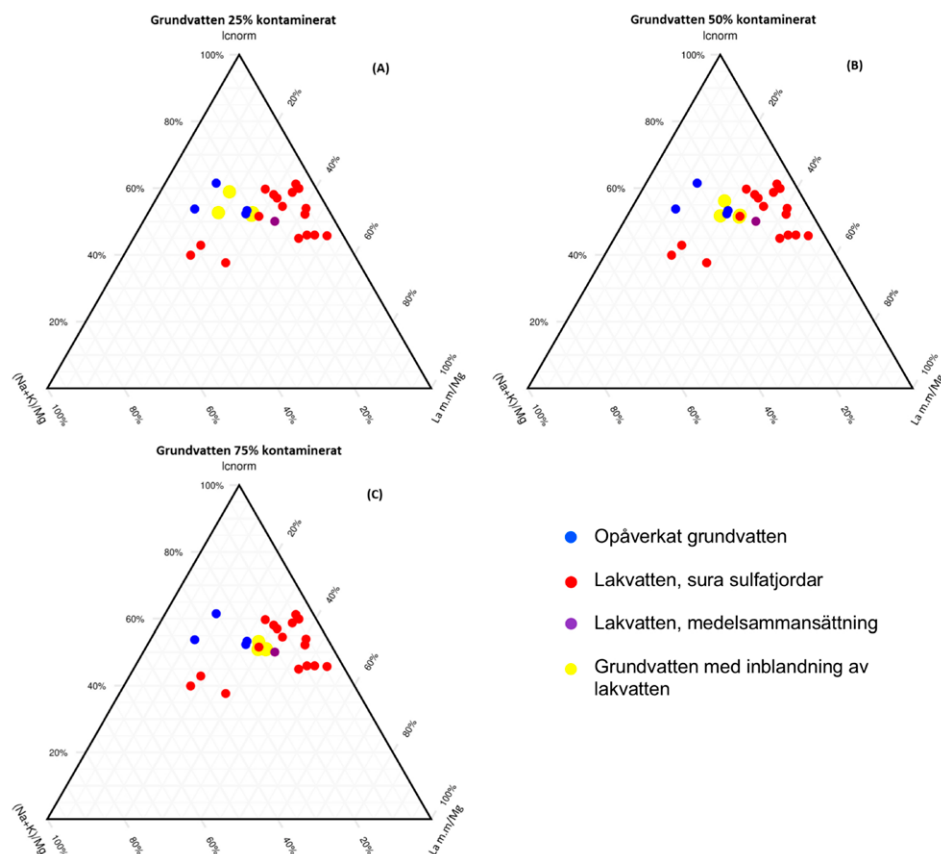
Triangelndiagrammet i figur 6.12 visar ett generellt sätt att plotta tre parametrar som är avsedda att indikera 1) ytvatten, 2) havsvattenintrång, och 3) en förorening. Ytvatten indikeras av parametern lc-excess (syre- och väteisotoper som indikerar avdunstning) och havsvatten indikeras av kvoten Na/Mg. Föroreningar indikeras av en parameter som är lämplig för varje specifikt fall.



Figur 6.12

Generellt triangelndiagram avsett att indikera ytvatten, havsvattenintrång och en förorening i ett vatten.

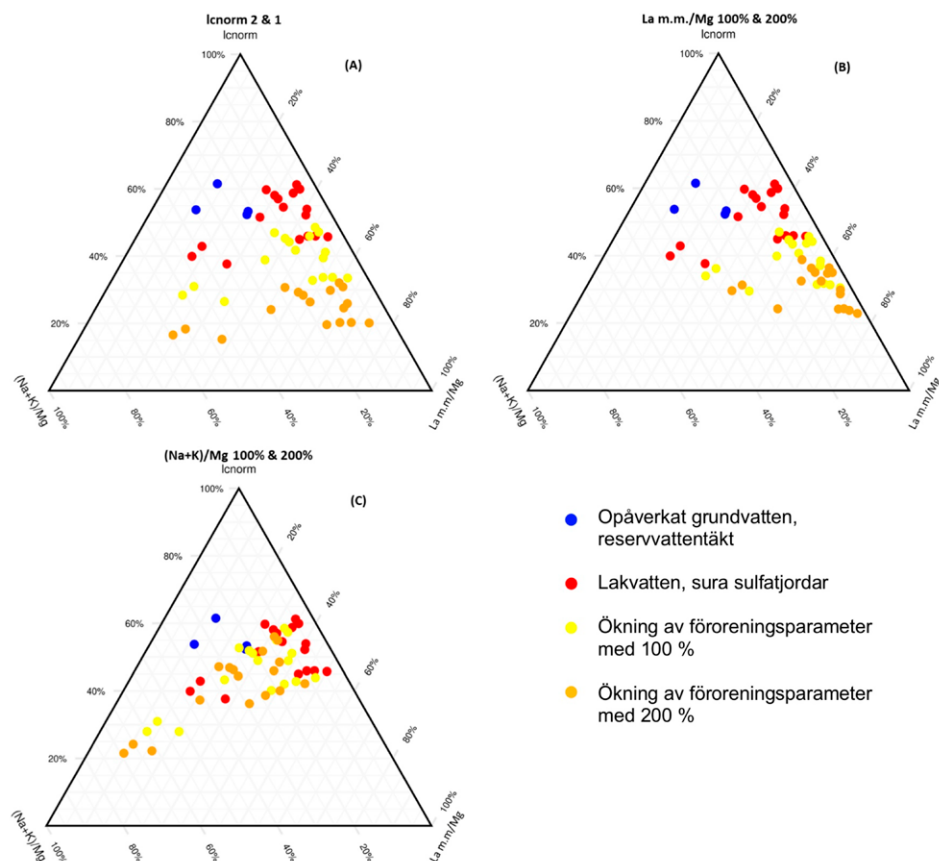
Triangelndiagrammen i figur 6.13 och 6.14 visar ett generellt, teoretiskt exempel, där diagramtypen i figur 6.12 används för att illustrera hur förorening av en opåverkad vattentäkt kan indikeras. Den opåverkade vattentäkten representeras av Luleå kommuns reservvattentäkt vid Gäddvik (grundvatten), och den teoretiska föroreningen representeras av lakvatten från sura sulfatjordar med pH lägre än 4,6 (ytvatten). I diagrammen används lc-excess och $(\text{Na} + \text{K})/\text{Mg}$ för att indikera ytvatten respektive havsvattenintrång, och lantan-parametern $(\text{La mm})/\text{Mg}$ indikerar sura lakvatten med höga halter av lantan, kadmium, kobolt, mangan, nickel och zink (Wennström, 2017). I andra specifika fall kan denna parameter bytas ut mot en indikator för den förorening som då är aktuell. Figur 6.13 A–C visar inblandning av 25 %, 50 %, respektive 75 % lakvatten från sura sulfatjordar i opåverkat grundvatten vid reservvattentäkten. Med ökande inblandning av ytligt lakvatten förskjuts blandningen av lakvatten och grundvatten allt mer mot lakvattnets sammansättning. Minskningen av parametern lc_{norm} (normaliserad lc-excess) visar samtidigt på en ökad inblandning av ytvatten. Parametern $(\text{Na} + \text{K})/\text{Mg}$ indikerar havsvattenintrång, och de tre punkter som plottas närmast $(\text{Na} + \text{K})/\text{Mg}$ hörnet indikerar potentiella fall av havsvattenintrång. I övrigt ses inga spår av havsvattenintrång.



Figur 6.13

Triangeldiagram med de tre parametrarna $I_{c-excess}$ normalisering (I_{cnorm}), $(Na + K)/Mg$ och $La\ mm/Mg$. I_{cnorm} indikerar ytvatten påverkade av avdunstning, $(Na + K)/Mg$ indikerar havsvatten, och $La\ mm/Mg$ indikerar lakvatten från sura sulfatjordar. Figur A till C visar inblandning av 25 %, 50 %, respektive 75 % surt lakvatten i grundvatten.

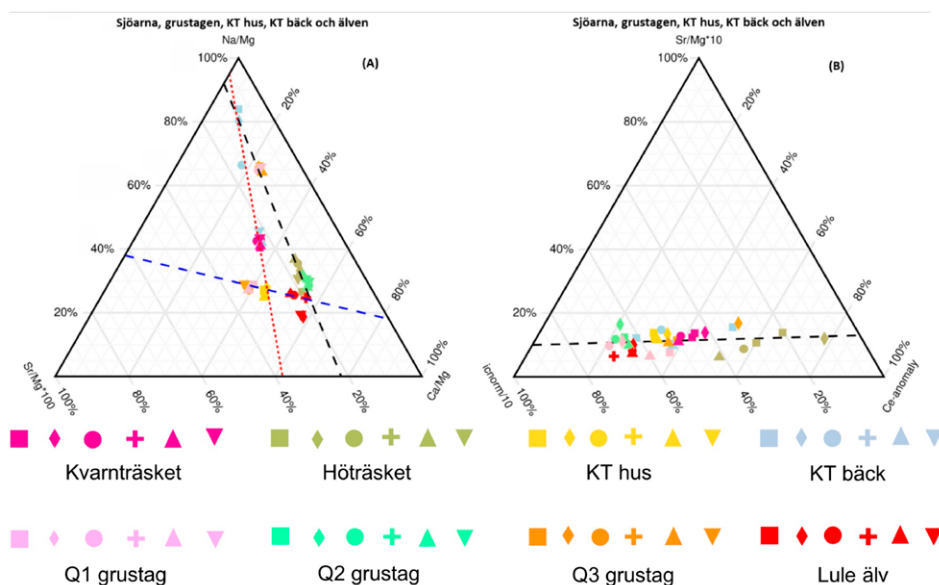
Figur 6.14 illustrerar tre olika teoretiska fall där en parameter varierar kraftigt för att tydligt visa hur datapunkterna förskjuts i triangeldiagrammen och hur dessa variationer kan tolkas. I figur 6.14 A varierar de normaliserade $I_{c-excess}$ värdena för det sura lakvattnet. Datapunkternas förskjutning mot lägre I_{cnorm} -värden (från ca 60 % till 20 %) indikerar en ökande inblandning av ytvatten som påverkats av avdunstning. Figur 6.14 B illustrerar ett exempel där parametern $La\ mm/Mg$ ökar med 100% och 200% indikerande lakvatten från sura sulfatjordar. I figur 6.14 C ökas $(Na + K)/Mg$ kvoten med 100% och 200%, vilket indikerar ett ökande havsvattenintrång.



Figur 6.14

Triangeldiagram med de tre parametrarna normaliserad lc-excess (lcnorm), (Na + K)/Mg och La mm/Mg. lcnorm indikerar ytvatten påverkade av avdunstning, (Na + K)/Mg indikerar havsvatten, och La mm/Mg indikerar lakvatten från sura sulfatjordar. Diagrammen visar hur opåverkat grundvatten från reservvattentäkten och lakvatten från sura sulfatjordar påverkas när en parameter i taget varieras. Figur A: lcnorm varieras med värdet 100 % respektive 200 %. Figur B: La mm/Mg ökas 100 % respektive 200 %. Figur C: Havsvattenintrång ökas 100 % respektive 200 %.

Figur 6.15 visar hur trender i datamaterialet från Gäddviksområdet framträder i triangeldiagram. Diagrammet i figur 6.15 A visar grupperingar av vissa provpunkter, två linjära trender från Na/Mg-hörnet ner till Sr/Mg*100 – Ca/Mg-axeln (röd och svart linje), samt en linjär trend från Ca/Mg hörnet mot Sr/Mg*100 – Na/Mg-axeln (blå linje). Figur 6.15 (B) visar en trend med tydlig spridning längs lcnorm/10 – Ce-anomali-axeln. Denna typ av trender i triangeldiagram kan användas för att kvalitativt indikera olika typer av möjliga blandningar mellan vattenmassor. Om ändkomponenternas element- och isotopsammansättningar är kända kan sedan kvantitativa blandningsmodeller konstrueras.



Figur 6.15

Triangeldiagram som visar möjligheter att kvalitativt indikera olika typer av möjliga blandningar mellan vattenmassor. Datapunkter som bildar en linjär trend indikerar blandningar av två eller tre olika vattenmassor. Provtagningsstillfällen: september 2018 (kvadrat), oktober 2018 (diamant), november 2018 (cirkel), april 2019 (kors), juni 2019 (triangel upp) och september 2019 (triangel ner).

7 Slutsatser och fortsatt arbete

Ett förslag som tidigare framförts är att utveckla en sårbarhetskarta för vattentäkter med hänsyn till klimatbetingade risker (se avsnitt 2.2). Sårbarhetskartan skulle även innehålla data från de inventeringar av förorenade områden som genomförts av länsstyrelser. Vi föreslår här att de kemiska analyser som utförs vid framtida inventeringar i anslutning till vattentäkter som standard bör omfatta de element och isotoper som ingår i det baspaket som presenteras i avsnitt 7.1.

De kombinationer av element- och isotopdata som använts i denna studie visar stor potential som verktyg för karaktärisering/spårning av källor och transportvägar för vatten i anslutning till vattentäkter. Nedanstående element- och isotopdata kan även plottas i olika diagramtyper för att illustrera förekomsten av vatten med olika ursprung som kan utgöra ändkomponenter i blandningar av olika vattenmassor.

- Screeninganalyser ger data för ett stort antal element som dels kan användas för att tolka geokemiska processer, dels kan indikera förekomst av sk Technology-Critical Elements (TCE's) vars halter i mark och vatten förväntas öka i framtiden.
- Element/Mg-kvoter kan användas för att indikera olika vattentyper, t ex älvvatten och havsvatten. Kvalitetsskillnader mellan den lågt exploaterade reservvattentäkten och Luleå kommuns huvudvattentäkt kan observeras med hjälp av Na/Mg-kvoter som indikerar havsvatteninträngning i huvudvattentäkten vid stora vattenuttag.
- Genom att beräkna den sk ceriumanomalin fås en indirekt indikation på om ett vatten har varit utsatt för oxiderande förhållanden (ytvatten), eller om vattnet domineras av en grundvattenkomponent som transporterats i reducerande förhållanden.
- Syre- och väteisotoper plottade i ett diagram för en Local Meteoric Water Line och beräkning av parametern δd -excess är generellt användbara för att lokalisera ytvattenintrång i grundvatten / dricksvattentäkter. Även här kan kvalitetsskillnader mellan reservvattentäkten och Luleå kommuns huvudvattentäkt observeras, där syre- och väteisotoper visar större inflöden av ytvatten i huvudvattentäkten på grund av infiltrationen av vatten från Luleälven.
- Andra isotopsystem för t ex bly, bor, litium, strontium och uran är användbara för att indikera vatten med olika ursprung i anslutning till vattentäkter.

För att utveckla möjligheterna att spåra källor och transportvägar för råvatten i anslutning till dricksvattentäkter föreslås att:

- Ett kemiskt analyspaket utvecklas, där ett antal huvudparametrar ingår som kan fungera som indikatorer för vatten av olika ursprung. Analyspaketet kan kompletteras med analyser av specifika isotoper och föroreningar som kan vara aktuella vid olika vattentäkter.
- Ett mjukvarubaserat tolkningsverktyg utvecklas för att underlätta tolkningen av vattenanalysdata.

7.1 Kemiskt analyspaket

Ett kemiskt analyspaket som i huvudsak bygger på befintliga analyser som kan beställas idag beräknas kunna lanseras av ALS Scandinavia AB under 2021. Ett analyspaket förenklar beställningen av rätt kombination av parametrar lämpade för att spåra råvattenursprung och eventuell föroreningspåverkan vid vattentäkter. VA-organisationer och andra aktörer inom råvattenförsörjning kan då i samråd med ALS Scandinavia AB beställa de analyser som är bäst lämpade för ett aktuellt projekt. Ett analyspaket med

en standarduppsättning av parametrar underlättar också uppbyggandet av en databas med relevanta analyser som kan indikera eventuell klimatpåverkan vid vattentäkter, och i en akut föroreningsituation vid en vattentäkt skulle analysdata finnas tillgängliga lämpade för spårning av förorenings ursprung.

Föreslaget analyspaket är indelat i ett Baspaket samt ett antal Tilläggsanalyser (Tabell 7.1). Baspaketet innehåller screeninganalyser och syre- och väteisotoper, en kombination av parametrar som ger möjlighet att spåra havsvattenintrång och TCE-element samt att skilja mellan grundvatten och ytvatten. Som tilläggsanalyser kan ett antal isotopsystem väljas, dels för att spåra vatten av olika ursprung och dels för att spåra källor för specifika föroreningsmetaller. Möjligheter finns även att analysera föroreningsspecifika ämnen som t ex PFAS (tabell 7.1). Goda möjligheter finns dock att i framtiden inkludera även nya analysparametrar i takt med att ICP-MS analystekniken utvecklas, och nya isotopsystem kommer med all sannolikhet att kunna inkluderas i analyspaketet inom en femårsperiod.

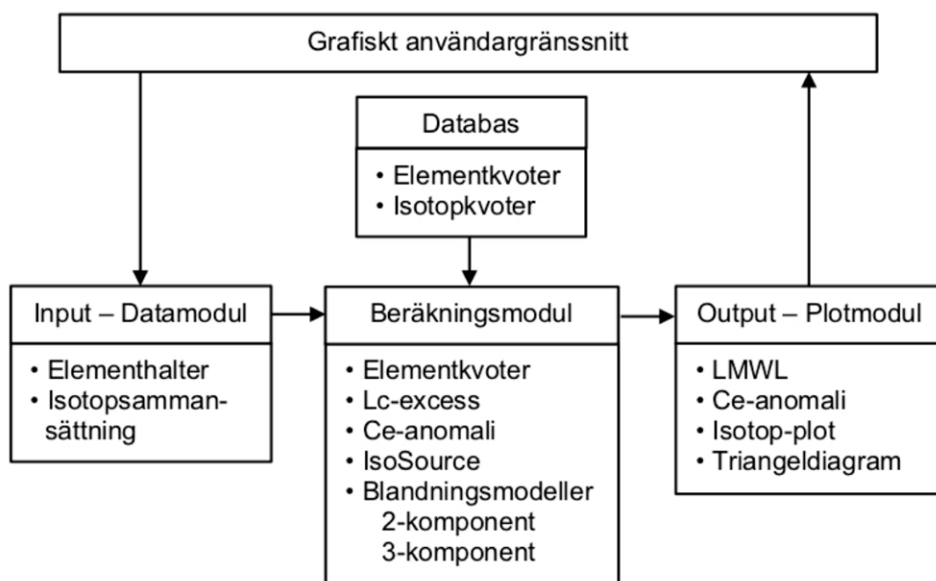
Baspaket	Element / isotoper	Spårning
Screeninganalyser	Huvud- och spårelement TCE Ce, La, Nb för beräkning av Ce-anomali	Elementkvoter för spårning av havsvattenintrång, avdunstning Specifika TCE Skilja mellan grundvatten och ytvatten
Syre- och väteisotoper	Syre- och väteisotoper	Skilja mellan grundvatten och ytvatten
Tilläggsanalyser	Element / isotoper	Spårning
Specifika isotoper	B, Pb, Li, Sr, U Cu, Cd, Cr, Pb, Zn	Havsvattenintrång och vatten av olika ursprung Källor för specifika föroreningsmetaller
Föroreningsspecifika ämnen	PFAS Andra specifika föroreningar	Föroreningskällor

7.2 Tolkningsverktyg

För att standardisera och förenkla tolkningar av vattenkemiska data från det föreslagna analyspaketet bör ett användarvänligt mjukvarubaserat tolkningsverktyg utvecklas. En översiktlig struktur föreslås i figur 7.1. Tolkningsverktyget innehåller ett grafiskt användargränssnitt för inmatning av data och presentation av resultat. Efter inmatning av elementhalter och isotopkvoter för ett specifikt undersökningsområde i en datamodul utförs element- och isotopberäkningar i en beräkningsmodul. I en plotmodul väljs sedan hur dessa beräkningar ska presenteras i olika diagramtyper. Tolkningsverktyget innehåller även en databas, med element- och isotopkvoter för ett antal vattentyper och föroreningar, t ex havsvatten, dricksvattentäkter, älvvatten och punktkällor för föroreningar med känd sammansättning.

Tabell 7.1

Kemiskt analyspaket som föreslås för att förbättra möjligheter att spåra ursprung och transportvägar för vatten och föroreningar i anslutning till vattentäkter.



Figur 7.1

Struktur för mjukvara som föreslås utvecklas som tolkningsverktyg.

Referenser

- Aggarwal, J., Habicht-Mauche, J., Juarez, C., 2008. Application of heavy stable isotopes in forensic isotope geochemistry: A review. *Applied Geochemistry*, 23, 2658–2666.
- ALS, 2021. ALS Scandinavia AB. www.alsglobal.se [2021-05-04]
- Andersson, P. S., Porcelli, D., Wasserburg, G. J., Ingri, J., 1998. Particle Transport of ^{234}U - ^{238}U in the Kalix River and in the Baltic Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 385–392.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton, 328 pp.
- EHP, 2021. EHP Environment. <https://www.ehpenvironment.com/> [2021-04-27]
- Eriksson Solander, V., 2020. Vattengeokemi och syre-väteisotoper som verktyg för spårning av vattenkällor vid vattentäkter: En fältstudie vid Gäddviksområdet i Luleå. Examensarbete, Luleå tekniska universitet.
- Erixon, P., 2009. Klimatstyrda sulfidoxidationer som orsak till surhet och höga metallhalter i vattendrag i norra Sverige. Forskningsrapport, Luleå tekniska universitet.
- Faure, G., 1991. *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry*. MacMillan Publishing Company, New York, 626 pp.
- Frimmel, F. H., Immerz, A., Niedermann, H., 1983. Heavy metal interaction with aquatic humus. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 14:2, 105–115.
- Hogan, J. F., Blum, J. D., 2003. Boron and lithium isotopes as groundwater tracers: a study at the Fresh Kills Landfill, Staten Island, New York, USA. *Applied Geochemistry*, 18, 615–627.
- Ingri, J., Widerlund, A., Land, M., Gustafsson, Ö., Andersson, P., Öhlander, B., 2000. Temporal variations in the fractionation of the rare earth elements in a boreal river; the role of colloidal particles. *Chemical Geology*, 166, 23–45.
- Ingri, J., Widerlund, A., Land, M., 2005. Geochemistry of major elements in a pristine boreal river system; Hydrological compartments and flow paths. *Aquatic Geochemistry*, 11, 57–88.
- Iso-Analytical, 2021. <http://www.iso-analytical.co.uk/> [2021-05-04]
- Kendall, C., Caldwell, E. A., 1998. Fundamentals of isotope geochemistry. Ingår i: C. Kendall och J.J. McDonnell (Eds.), *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 519–576
- Komarek, M., Ettler, V., Chrástný, V., Mihaljevič, M., 2008. Lead isotopes in environmental sciences: A review. *Environ. Inter.*, 34(4), 562–577.
- Kritzberg, E. S., Ekström, M., 2012. Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? *Biogeosciences*, 9, 1465–1478.
- Lempinen, S., 2019. Grundvattenkaraktärisering med syreisotoper. En fältstudie i Gäddviks vattentäkt i Luleå. Examensarbete, Luleå tekniska universitet.
- Livsmedelsverket, 2019. Nationellt nätverk för dricksvatten. En gemensam strategi. <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/om-oss/samarbeten/nationellt-natverk-dricksvatten/strategi-nationellt-natverk-dricksvatten.pdf> [2020-12-22].
- Millero, F. J., 2008. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50–72.

-
- Murphy, B, Morrison, R., 2014. Introduction to Environmental Forensics. Academic Press.
- Naturvårdsverket, 2011. Naturvårdsverkets handbok om vattenskyddsområde. Naturvårdsverket, Handbok 2010:5.
- Norrström, A. C., Knutsson, G., 2012. Stable lead isotopes as tracers of groundwater pollution in the water supply for a small village. *Environmental Earth Science* 67, 1085–1095.
- Paces, J. B., Wurster, F. C., 2014. Natural uranium and strontium isotope tracers of water sources and surface water–groundwater interactions in arid wetlands – Pahrnagat Valley, Nevada, USA. *Journal of Hydrology*, 517, 213–225.
- Paulsson, O., Widerlund, A., 2020. Pit lake oxygen and hydrogen isotopic composition in subarctic Sweden: A comparison to the local meteoric water line. *Applied Geochemistry*, 118, 104611.
- Phillips, D. L., Newsome, S. D., Gregg, J. W., 2005. Combining sources in stable isotope mixing models: Alternative methods. *Oecologia*, 144, 520–527.
- Pontér, S., Pallavicini, N., Engström, E., Baxter, D. C., Rodushkin, I., 2016. Chromium isotope ratio measurements in environmental matrices by MC–ICP–MS. *J. Anal. At. Spectrom.*, 31, 1464–1471.
- Pontér, S., Sutliff-Johansson, S., Engström, E., Widerlund, A., Mäki, A., Rodushkina, K., Paulukat, C., Rodushkin, I., 2021. Evaluation of a multi-isotope approach as a complement to concentration data within Environmental Forensics. *Minerals*, 11(1), 37.
- Pourret, O., Davranche, M., Gruau, G., Dia, A., 2008. New insights into cerium anomalies in organic-rich alkaline waters. *Chemical Geology*, 251, 120–127.
- Ravikumar, P., Somashekar, R. K., Prakash, K. L., 2015. A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India. *Elixir Earth Science*, 80, 31073–31077.
- Rodushkin, I., Engström, E., Sörlin, D., Pontér, C., Baxter, D. C., 2007. Osmium in environmental samples from Northeast Sweden. Part II. Identification of anthropogenic sources. *Science of the Total Environment*, 386, 159–168.
- SGU, 2007. Områden där grundvattennivån är av särskild betydelse för vattenkvalitet, markstabilitet eller ekosystem. Sveriges geologiska undersökning. Rapport 2007:20.
- SGU, 2012. Klimatets påverkan på koncentrationer av kemiska ämnen i grundvatten. Rapport 2012:27.
- SGU Kartvisare, 2020. <https://apps.sgu.se/kartvisare/> [2020-12-22]
- SLU, 2019. Svartberget dataportal. <https://franklin.vfp.slu.se/>
- SLU, 2021. <https://www.slu.se/en/departments/forest-ecology-management/ssil/liquids/> [2021-05-04]
- SMHI, 2020a. <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/klimatscenarier/> [2020-10-12].
- SMHI, 2020b. http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.36622!/IPCC_fakta_nr2korr.pdf [2020-10-12].
- SMHI, 2020c. <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-sverige/manadens-vader-i-sverige/ars-och-manadsstatistik> [2020-05-28]
- SOU, 2007. Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter. Statens offentliga utredningar, SOU 2007:60.
- SOU, 2015. Klimatförändringar och dricksvattenförsörjning. Statens offentliga utredningar, SOU 2015:51.
-

-
- Svenskt Vatten, 2019. <http://www.svensktvatten.se/utbildning/konferensdokumentation/dricksvatten-och-halsa/foi-dricksvatten29-30nov2017/kemiska-risker/> [2020-12-22]
- SVU, 2014. Svenskt Vatten Utveckling. Prioriterade områden.
- Ternaryplot, 2020. www.ternaryplot.com [2020-12-07]
- USGS, 2004. Line-conditioned excess: a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems. *Isotopes in Environmental Studies*. Monaco: International Atomic Energy Agency.
- USGS, 2020. Stable isotope mixing models for estimating source proportions. U S Geological Survey, <https://www.epa.gov/eco-research/stable-isotope-mixing-models-estimating-source-proportions> [2020-12-01].
- Viklander, M., Österlund, H., Müller, A., Marsalek, J., Borris, M., 2019. Kunskapssammanställning – Dagvattenkvalitet. Svenskt Vatten Utveckling, Rapport 2019–2.
- Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., 2020. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resources, Conservation & Recycling*, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669> [2020-12-01].
- Weiss, D. J., Rehkämper, M., Schoenberg, R., McLaughlin, M., Kirby, J., Campbell, P. G. C., Arnold, T., Chapman, J., Peel, K., Gioia, S., 2008. Application of non-traditional stable-isotope systems to the study of sources and fate of metals in the environment. *Environmental Science & Technology*, 42, 655–664.
- Wiederhold, J. G., 2015. Metal stable isotopes signatures as tracers in environmental geochemistry. *Environ. Sci. Technol.*, 49, 2606–2624.
- Widerlund, A., Andersson, P. S., 2011. Late Holocene freshening of the Baltic Sea derived from high-resolution strontium isotope analyses of mollusk shells. *Geology*, 39(2), 187–190.
- Widerlund, A., Chlot, S., Öhlander, B., 2014. Sedimentary records of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and organic matter accumulation in lakes receiving nutrient-rich mine waters. *Science of the Total Environment*, 485–486, 205–215.
- Wennström, S., 2017. Förekomst av metaller i diken och vattendrag vid sura sulfatjordar i kustnära områden i Norrbotten. Linéuniversitetet, Kalmar Växjö.
- Zachary, S., 2017. *Principles of Stable Isotope Geochemistry*, 2nd Edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Öhlander, B., Land, M., Ingri, J., Widerlund, A., 1996. Mobility of rare earth elements during weathering of till in northern Sweden. *Applied Geochemistry*, 11, 93–99.

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se