Klimatets påverkan på koncentrationer av kemiska ämnen i grundvatten

Mats Aastrup, Bo Thunholm, Gustav Sundén (SGU)
och Joel Dahné (SMHI)

december 2012

SGU-rapport 2012:27

SGU
Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Havs
och Vatten
myndigheten

Omslagsbild: Källa nära Tandådalen som ingår i den nationella miljöövervakningen.

Foto: Magdalena Thorsbrink

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

FÖRORD

Detta är en rapport på utvecklingsprojektet ”Klimatets påverkan på koncentrationer av kemiska ämnen i grundvatten” som Sveriges geologiska undersökning (SGU) fick i uppdrag av Naturvårdsverket i maj 2011att genomföra inom ramen för programområdet Sötvatten. Nyinrättade Havs och Vattenmyndigheten övertog den vattenrelaterade miljöövervakningen från Naturvårdsverket och så också detta projekt. Inledningsvis var Lotta Lewin Pihlblad projektledare. Mats Aastrup ansvarar för projektets uppläggning och genomförande i nära samarbete med Bo Thunholm, som utfört de statistiska beräkningarna och Gustav Sundén, som vidareutvecklat resultaten av de med modeller prognosticerade grundvattennivåerna samt genomfört GIS-arbetet. Havs och Vattenmyndigheten gav genom sin ansvariga handläggare Åsa M. Andersson SGU möjlighet att förlänga projektet för att utöka antalet punkter där grundvattennivåer kunde prognosticeras för att få en bättre Sverigebild över de klimatrelaterade förändringarna i kemiska ämnens koncentrationer. SGU har genom avtal anlitat Joel Dahné vid SMHI för att utföra modelleringen av grundvattennivåerna med resultaten från klimatmodelleringarna som drivvariabler.

INNEHÅLL

Bakgrund **2**

Syfte **8**

Metoder **8**

Urval av stationer för beräkning av relationer mellan nivå och kemi 8

Resultat **10**

Samband mellan grundvattennivåer och grundvattenkemi 10

Beräkningar av framtida grundvattenkemiska tillstånd och variationer 17

Slutsatser **29**

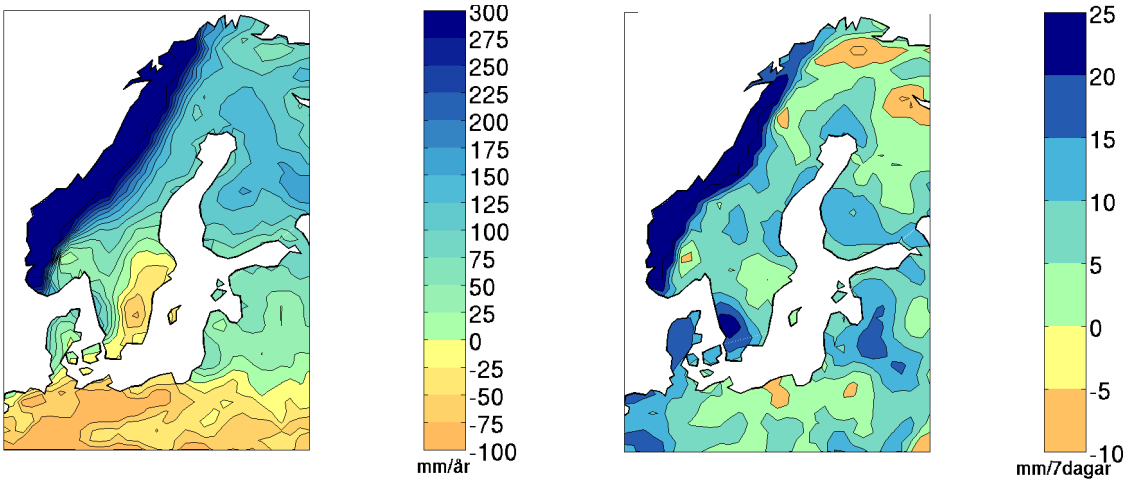
Litteratur **30**

BAKGRUND

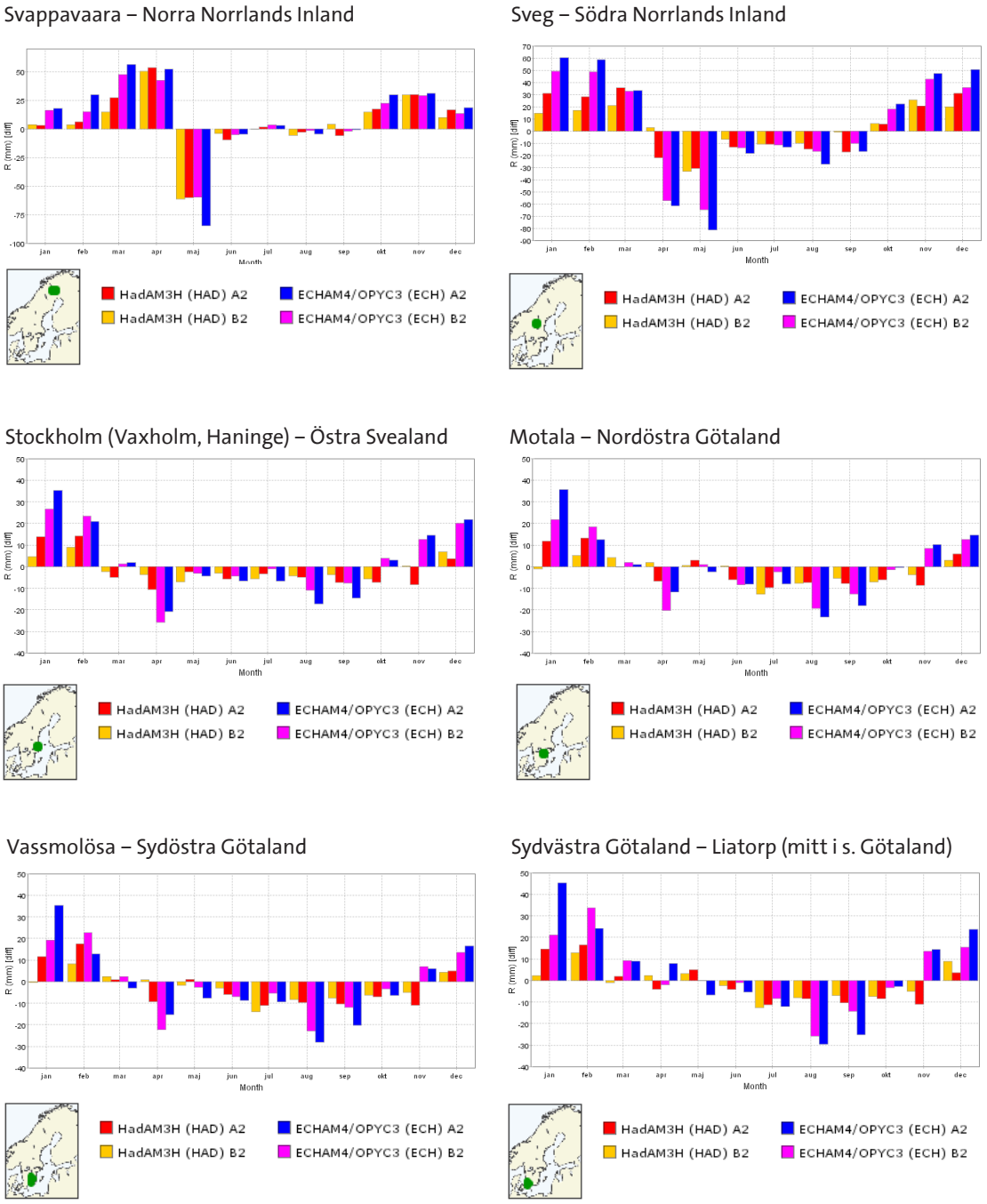
Ett förändrat klimat, temperatur och nederbörd, ger förändrade förutsättningar för hydrologin. Enligt de klimatscenarier som tagits fram innebär det större mängd nederbörd för huvuddelen av landet. Sydöstra Sverige, som redan idag är det torraste området, kommer dock att få minskad nederbörd. Det innebär ökad årlig avrinning och grundvattenbildning i större delen av landet med undantag av sydöstra delen (fig. 1). Enligt klimatscenarier genomförda av SMHI för 30-årsperioden 2071–2100 för sex områden fördelade över landet där SGU har observationsrör för grundvattennivåmätningar kommer samstämmigt avrinningen att öka under vinter/vår och höst, medan den kommer att minska under sommarmånaderna i förhållande till dagens avrinningsregimer (fig. 2).

De största skillnaderna mellan den prognosticerade avrinningen och avrinningen under perioden 1961–1990 kommer att uppträda i mellersta Norrlands inland och i norra Norrland. I östra Svealand och i Götaland kommer, enligt SMHI:s scenarier, förändringarna att vara betydligt mer blygsamma (Ojala m.fl. 2007). Det här kommer naturligtvis att mer eller mindre förändra grundvattenflödenas storlek och årliga regimer.

I ett fortsättningsprojekt (Sundén m.fl. 2010) har ytterligare analys och utvärdering gjorts för att bättre kunna kvantifiera klimatförändringarnas påverkan på grundvattennivåernas läge och variation under året där drivdata är olika klimatscenarier. Vid beräkning av grundvattennivåer har den så kallade GRV-modellen, använts. Det är en utveckling av HBV-modellen (Bergström 1976, Lindström m.fl. 1997) som beskrivits av Rodhe m.fl. (2006, 2008 & 2009). Utveckling av modellen har genomförts av Uppsala Universitet och SMHI i samarbete inom ramen för SGU-finansierade FoU-projekt. Modellen har begränsningar avseende möjligheten att behandla grundvattenmagasin med skiktad lagerföljd samt slutna förhållanden. Därför valdes för fortsättningsprojektet ett begränsat antal mätstationer i grundvattennätet ut i magasin som uppfyller kriterierna för att tillämpa GRV-modellen, men ändå med olika hydrogeologiska egenskaper och med en god geografisk spridning (tabell 1).



Figur 1. Skillnad i effektiv nederbörd (nederbörd minus avdunstning) på årsbasis (vänster) och i störst effektiv nederbörd under en sammanhängande 7-dagars period. Perioden 2071–2100 jämfört med 1961–1990. Effektiv nederbörd är den del av nederbörden som bildar avrinning och i inströmningsområden bildar grundvatten. Tidigare publicerad i SGU-rapport 2007:9.



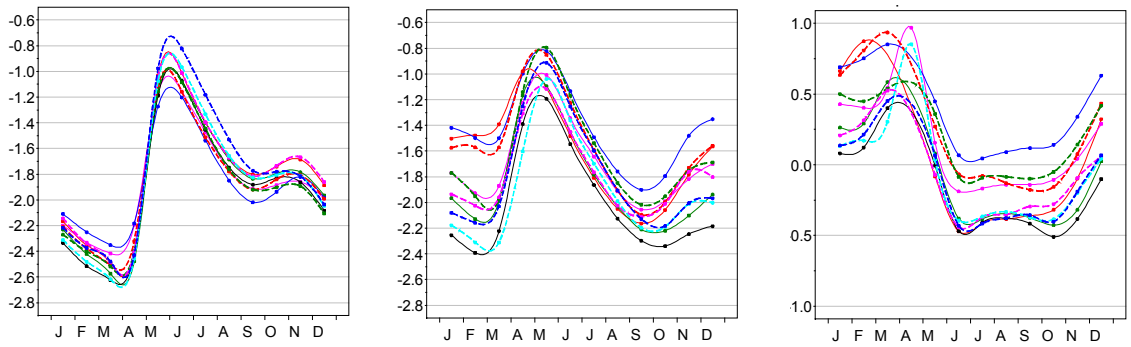
Figur 2. Beräknad förändring i avrinning (mm) mellan perioden 2071–2100 och perioden 1961–1990. Klimatscenarier körda med olika modeller och olika koldioxidutsläpp för geografiska områden där SGU har övervakningsstationer för mätningar av grundvattennivåer. Under vintermånaderna (december–februari) kommer avrinningen att öka för samtliga områden. Under månaderna juni, juli, augusti och september sker en minskning av avrinningen. I de nordliga områdena Sveg och Svappavaara ökar avrinningen under oktober och november, medan den fortsätter vara lägre än ”idag” i övriga områden enligt en global klimatmodell (H, HadAM3H) men lite högre enligt en annan global klimatmodell (E, ECHAM4/OPYC3). De stora dragen i förändringarna är ganska samstämmiga även om det naturligtvis är osäkerheter i detaljerna. Vad vi trots allt kan vara säkra på är att klimatförändringarna kommer att förändra vattenflödet och därmed grundvattennivåerna (Ojala 2007).

Tabell 1. Stationer i SGUs Grundvattennät som valts ut för modellering av framtida grundvattennivåer i studien ”Grundvattennivåer och vattenförsörjning vid förändrat klimat”, SGU-rapport 2010:12

Stationsnr.	Stations-namn	Område	Akvifertyp	Jordart	Mag.storlek	Grundvatten-nivå, medel, m.u.m*	Variations-bredd, m
7009	Böda	Öland	Jord, öppen	Sand	Stor	5,49	1,55
15007	Herrljunga1	Västra Götaland	Jord, öppen	Morän	Liten	3,62	3,42
15008	Herrljunga2	Västra Götaland	Jord, öppen	Morän	Liten	2,06	3,50
17008	Hallsberg1	Södra Svealand	Jord, öppen	Sand	Stor	7,07	1,93
17009	Hallsberg2	Södra Svealand	Jord, öppen	Sand	Liten	1,19	2,18
23020	Tärnsjö1	Norra Svealand	Jord, öppen	Grus	Stor	9,00	1,59
23021	Tärnsjö2	Norra Svealand	Jord, öppen	Sand	Liten	1,06	1,12
32016	Åsele1	Inre Norrland	Jord, öppen	Sand	Stor	6,75	2,84
32022	Åsele2	Inre Norrland	Jord, öppen	Morän	Liten	1,41	3,32
41007	Sand-hammaren	Södra Skåne	Jord, öppen	Sand	Stor	5,17	1,34
64001	Vikbolandet	Nordöstra Götaland	Jord, öppen	Morän	Liten	2,10	2,00
72003	Ronneby1	Sydöstra Götaland	Jord, öppen	Sand	Stor	2,84	1,45
72023	Ronneby2	Sydöstra Götaland	Jord, öppen	Morän	Liten	2,21	3,15
72024	Ronneby3	Sydöstra Götaland	Jord, öppen	Morän	Liten	1,49	3,16

*Meter under markytan.

32022 Åsele, mellersta Norrland

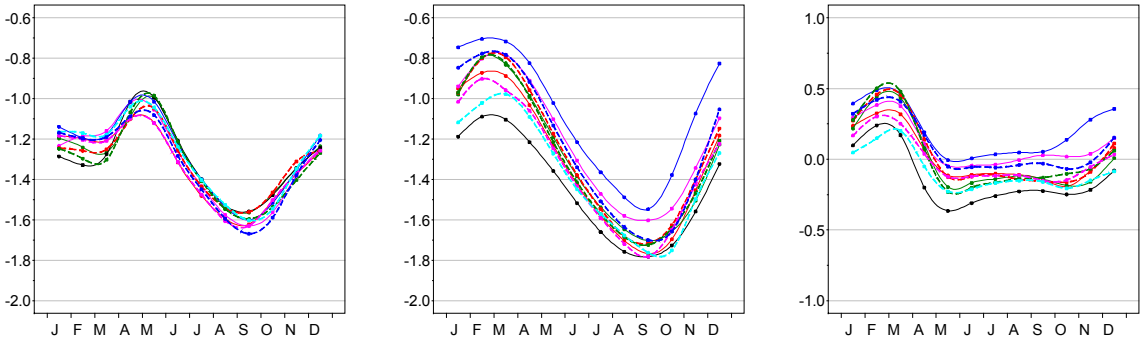


Figur 3. Månadsmedelvärden för station 32022 (Åsele). Figuren till vänster representerar månadsmedelnivåerna för perioden 1961–1990, figuren i mitten representerar perioden 2071–2100 och figuren till höger representerar skillnaden mellan dessa perioder (från SGU-Rapport 2010:12).

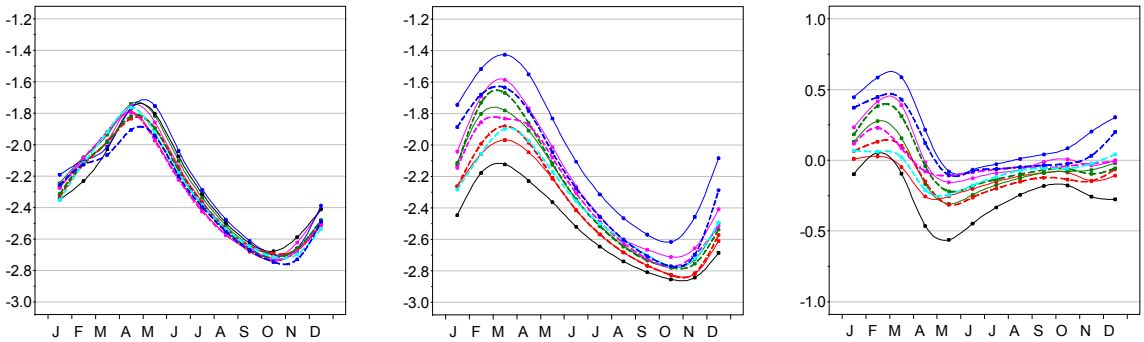
GRV-modellen drivs av dagliga temperatur- och nederbördsdata. Som drivdata för beräkning av framtida grundvattennivåer användes resultaten från tio klimatscenarier framtagna inom EU. För fem av stationerna i små öppna akviferer (morän eller sand) redovisas här regimerna som månadsmedelkurvor för den första och den sista modellerade 30-årsperioden, 1961–1990 respektive 2071–2100 liksom skillnaderna mellan dessa (fig. 3 & 4).

En grov jämförelse av nuvarande grundvattenregimer (1961–1990) med förväntade framtida (2071–2100) kan göras genom att använda resultaten från de fem moränstationernas modellerade grundvattennivåer (se ovan).

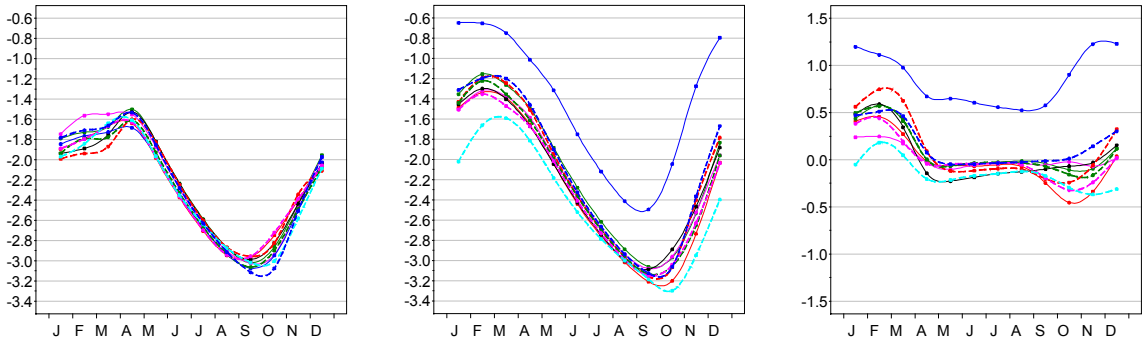
17009 Hallsberg, södra Svealand



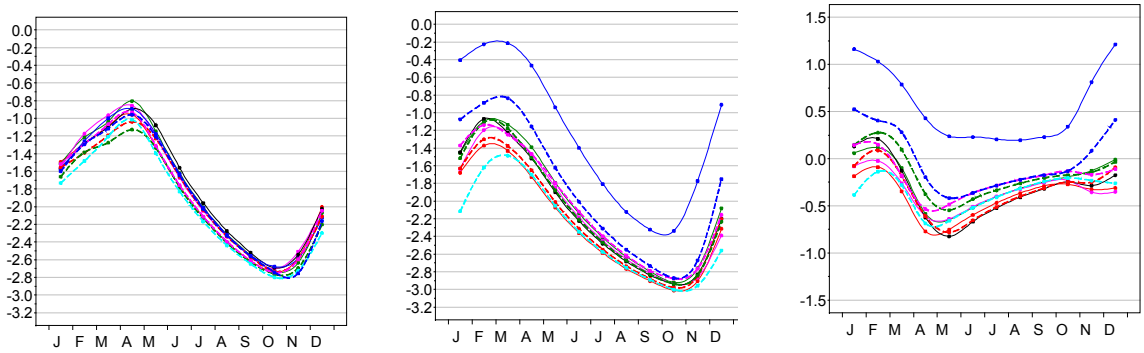
64001 Vikbolandet, nordöstra Götaland



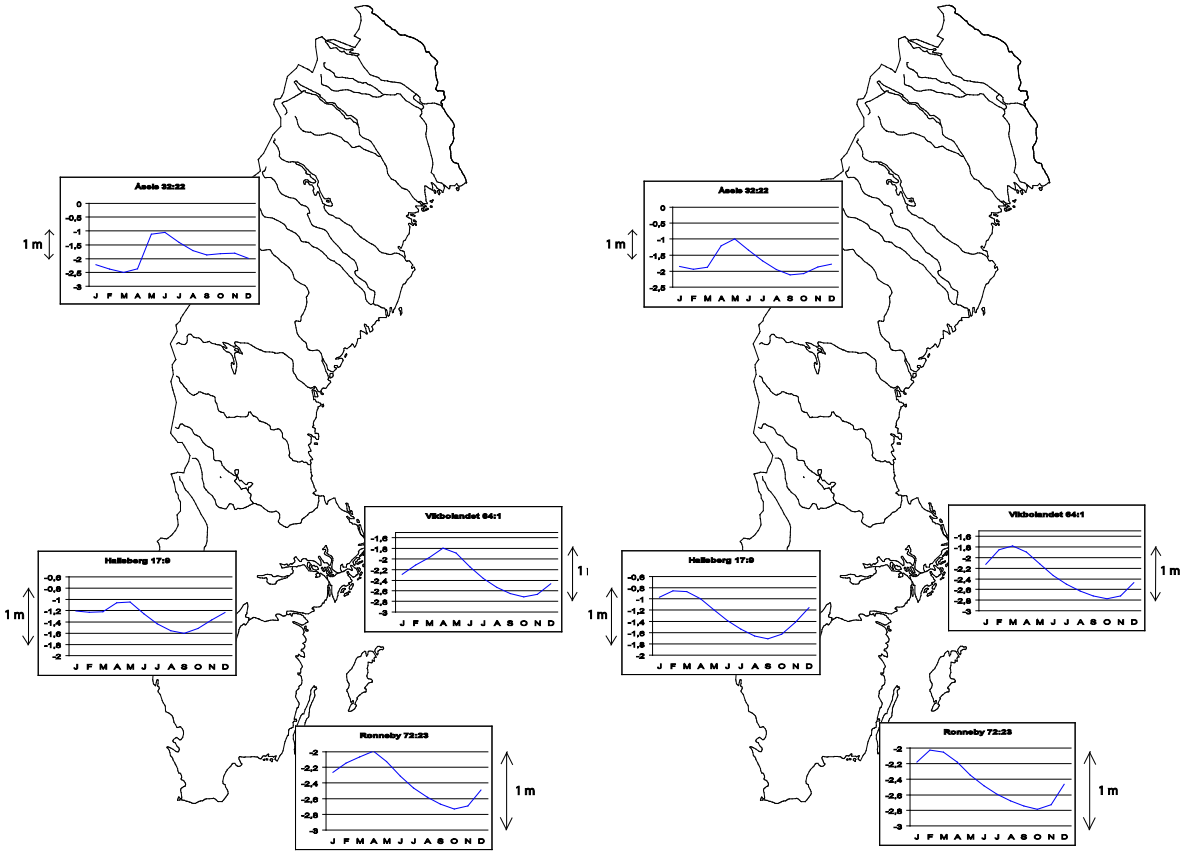
15008 Herrljunga, västra Götaland



72024 Ronneby, södra Götaland



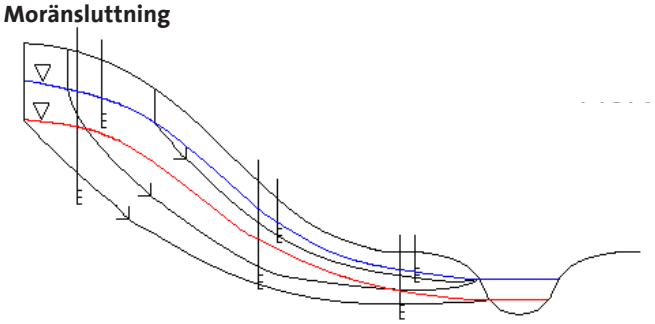
Figur 4. Månadsmedelvärden för grundvattennivåer i stationerna 17009, 64001, 15008 och 72024. Graferna till vänster representerar månadsmedelnivåerna för perioden 1961–1990, graferna i mitten representerar prognosticerade månadsmedelnivåer för perioden 2071–2100 med olika modeller och graferna till höger representerar skillnaden mellan dessa perioder (från SGU-Rapport 2010:12).



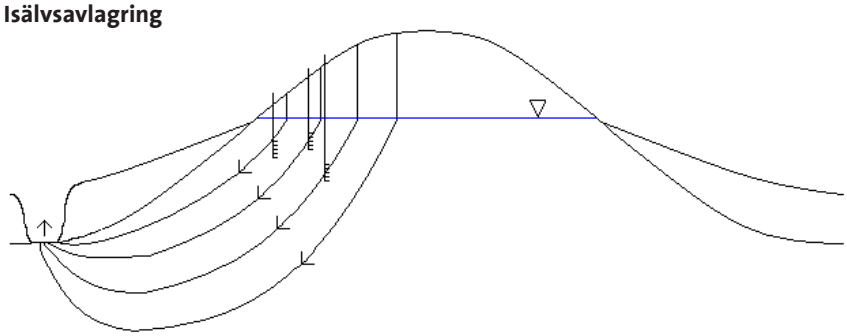
Nuvarande grundvattenregimer, 1961–1990 **Framtida grundvattenregimer, 2071–2100**

Figur 5. Förändring i grundvattenregimer i små grundvattenmagasin där nuvarande och framtida grundvattenregimer är beräknade ur medelvärdet av samtliga klimatscenariers månadsmedelnivåer för gällande tidsperioder (från SGU-rapport 2012:12).

Moränsluttning



Isälvsavlagring



Figur 6. Schematiska bilder över grundvattnets uppträdande i morän och i en isälvsavlagring. Provtagning av grundvatten görs i observationsrör eller i källor.

Dessa förändringar i grundvattennivåer kommer att innebära större eller mindre effekter på halterna av kemiska ämnen i mark- och grundvattensystemet. Det kommer att ha betydelse för såväl anslutande ytvatten- och terrestra ekosystem, som för kvaliteten på grundvatten som används för dricksvattenförsörjningen.

Teoretiskt innebär större nederbördsmängder snabbare perkolation av markvatten i den omättade zonen. Det borde medföra försvagade jonbytesprocesser och utspädd borttransport av vittringsprodukter, vilket betyder lägre halter i det vatten som bildar grundvatten. Detta torde vara allmängiltigt och gälla oavsett om markvattenperkolation och grundvattenbildning sker i isälvsavlagringarnas varierande, men relativt mäktiga, omättade zon eller i moräner med relativt tunn omättad zon (fig. 6). Mindre nederbördsmängder medför det omvända förhållandet.

Klimatförändringarna förväntas i isälvsavlagringar inte innebära någon större dramatik i förändringarna i grundvattennivåer. De kommer troligen i större delen av landet att stiga en till några 10-tals centimeter (Sundén m.fl. 2010). I moränsluttningar kan däremot klimatförändringarna innebära stora förändringar i grundvattennivåer. Högre grundvattennivåer förväntas innebära större andel mycket ytnära grundvattenflöde i och med att moräner har ett uppluckrat skikt med större vattensläpplighet mot ytan. Det innebär att grundvatten i större utsträckning genomströmmar markprofilens övre delar som är anrikade på organiskt material och vissa tungmetaller. Denna anrikning accentueras mot utströmningsområden mot ytvattendrag.

Hypotetiskt skulle detta innebära att grundvatten som flödar ut i källor eller vattendrag från moränområden under förhållanden med höga grundvattennivåer håller lägre halter av joner som är ett resultat av vittring och jonbytesprocesser i den omättade zonen, men högre halter organiskt material och metaller, framför allt de som är bundna till organiskt material.

Övervakning av grundvatten har genomförts av SGU i ett rikstäckande nät sedan 1968. Naturvårdsverket fick 1978 ansvar för miljöövervakningen och finansierar idag merparten av den grundvattenkemiska övervakningen. I de landstäckande näten Referensstationer grundvatten och SGUs grundvattennät övervakar ungefär hälften av stationerna grundvatten i moränmagasin och hälften grundvatten i sand- och grusavlagringar (isälvsavlagringar). Stationerna utgörs av källor, observationsrör och vattentäkter.

För tolkningen av övervakningsresultat är det väsentligt att förstå vad analysresultat från olika typer av stationer egentligen återspeglar. Prov från ett grundvattenrör med intag på ett visst djupintervall visar den kemiska sammansättningen just i det intervallet, men är resultatet av processer längs vattnets flödesbana till den punkten. Integrerad monitorering sker i områden med små skogbevuxna avrinningsområden, IM-områden. Där studeras effekter av luftburna föroreningar på skogliga ekosystem inom Naturvårdsverkets skogliga miljöövervakningsprogram. Grundvattenrör är utplacerade på olika djup och i olika delar från inströmningsområde till utströmningsområden för att kunna studera förändringar i grundvattnets kemi längs vattnets flödesvägar (fig. 6). Källor uppstår där grundvattnets trycknivå står ovan markytan. I källor kan grundvatten med olika långa flödesvägar och omsättningstid konvergera. Det betyder att blandningsförhållande mellan vatten med längre och kortare uppehållstider varierar med tiden på grund av variationer i grundvattennivåer. Vid perioder med låga grundvattennivåer rinner mer långtransporterat djupare grundvatten ut i källan och tvärt om vid perioder med höga grundvattennivåer. Detta är analogt med ut-

strömningen av grundvatten till vattendrag. Vattendynamiken i stora sand- och grusmagasin innebär att effekterna av åtminstone korttidsvariationer inom torra och våta episoder mer eller mindre utsläcks. Rumsliga variationer i den omättade zonens mäktighet inom ett och samma grundvattenmagasin bidrar också till detta (fig. 6).

Teoretiskt borde kemin i källornas vatten vara känsligast för variationer i grundvattennivåer, framför allt i moränkällor, följt av ytliga rör, vars intagssil ligger inom grundvattenytans fluktuationszon. Känsligheten för effekter av variationer i grundvattennivåer på den kemiska sammansättningen avtar med djupet.

SYFTE

Att utifrån befintliga grundvattenkemiska tidsserier från Miljöövervakningen (Referensstationer grundvatten och SGUs grundvattennät) och tidsserier av grundvattennivåer (SGUs Grundvattennät) med enkla statistiska bearbetningar försöka belysa:

- För vilka kemiska parametrar klimateffekterna har stor betydelse för tidsserieutvecklingen och om skillnader föreligger med avseende på magasinets geologiska sammansättning och typen av stationer,
- Om det går att fastställa skillnader i haltfördelningen hos kemiska parametrar under perioder då grundvattennivåerna är under respektive över långtidsmedelvärdet i grundvatten i stora grundvattenmagasin,
- Hur representativa de tidigare resultaten från IM-området Kindlas moränsluttning är genom att studera hur kemiska parametrars halter fördelar sig vid låga respektive höga grundvattennivåer i morängrundvatten från ett större antal provtagningsstationer fördelade över landet.

METODER

Genom att med befintliga tidsseriedata över grundvattenkemi och grundvattennivåer försöka visa hur koncentrationerna av olika kemiska komponenter skiljer sig åt vid höga och låga grundvattennivåer kan vi indikera troliga förändringar i grundvattnets kemiska sammansättning till följd av förändringar i klimatet. Enligt scenarierna kommer klimatförändringarna att innebära genomsnittligt högre grundvattennivåer i större delen av landet, medan den sydöstra delen kommer att få lägre grundvattennivåer, se avsnittet Bakgrund.

Genom att utnyttja den, genom statistiska beräkningar, funna relationerna mellan grundvattennivå och de olika kemiska parametrarnas halter kan halter för prognosticerade förändrade grundvattennivåer beräknas. I detta fall förändringar mellan 30-årsperioderna 1991–2020 och 2071–2100.

Urval av stationer för beräkning av relationer mellan nivå och kemi

Samtliga stationer där nivåmätningar eller kemiprovtagning görs, grupperades in i finkorniga jordarter (främst morän) och grovkorniga jordarter (främst sand och grus). Kemistationerna kopplades sedan till en eller flera nivåstationer. Kopplingen gjordes i GIS där en buffertzon kring varje nivåstation upprättades. För moränstationerna sattes den till en radie

på 40 km och för stationer i sand och grus sattes den till 70 km. De kemistationer som hamnade inom buffertzonen kopplades sedan till en eller flera nivåstationer (tabell 2). Uppgifter om grundvattennivå, som för varje station inom SGUs grundvattennät vanligtvis mäts två gånger per månad, användes för att med linjär interpolation skapa dygnsvärden för de nivåstationer som kopplats till någon kemistation. De interpolerade nivåerna standardiserades vilket innebär att tidsserien för varje station gavs medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. För att kunna visualisera sambandet mellan nivå och kemi testades olika klassindelningar för den standardiserade nivåvariabeln, x_s. En femgradig skala visade sig ge bäst resultat, se tabell 3.

Tabell 2. Nivå- och kemistationer samt kopplingen mellan dessa.

Nivåstation		Kemistation		Jordart
Område	Station	Område	Station	
5	1	5	13	Morän
5	3	5	13	Morän
16	18	16	71	Morän
16	26	16	71	Morän
16	29	16	71	Morän
16	42	16	71	Morän
16	90	16	71	Morän
16	93	16	71	Morän
16	94	16	71	Morän
16	96	16	71	Morän
29	6	1800	1	Morän
39	1	39	116	Morän
39	5	39	116	Morän
39	8	39	116	Morän
39	10	39	116	Morän
50	8	50	14	Morän
50	11	50	14	Morän
50	12	50	14	Morän
50	13	50	14	Morän
54	10	54	18	Morän
58	5	58	6	Morän
68	4	68	9	Morän
68	5	68	9	Morän
68	7	68	9	Morän
3	26	3	49	Sand/grus
23	2	23	11	Sand/grus
17	1	17	11	Sand/grus
17	6	17	11	Sand/grus
17	7	17	11	Sand/grus
17	8	17	11	Sand/grus
17	9	17	11	Sand/grus
19	3	19	15	Sand/grus
19	9	19	15	Sand/grus
19	11	19	15	Sand/grus
19	13	19	15	Sand/grus
19	14	19	15	Sand/grus
19	17	19	15	Sand/grus
19	18	19	15	Sand/grus
34	6	34	15	Sand/grus
34	10	34	15	Sand/grus
34	12	34	15	Sand/grus
58	1	58	4	Sand/grus
58	2	58	4	Sand/grus
70	5	70	13	Sand/grus
70	7	70	13	Sand/grus
70	9	70	13	Sand/grus
70	10	70	13	Sand/grus
37	50	37	54	Sand/grus
19	5	19	15	Sand/grus
17	2	17	11	Sand/grus
3	26	3	49	Sand/grus
23	2	23	11	Sand/grus
17	1	17	11	Sand/grus
17	6	17	11	Sand/grus
17	7	17	11	Sand/grus
17	8	17	11	Sand/grus

Tabell 3. Femgradig klassindelning för den standardiserade nivåvariabeln, x_s.

Standardiserad nivåvariabel, x_s	Klass
$x_s < -1{,}0$	-2
$-1{,}0 \leq x_s < -0{,}33$	-1
$-0{,}33 \leq x_s < 033$	0
$0{,}33 \leq x_s < 1.0$	1
$x_s \geq 1{,}0$	2

Även de grundvattenkemiska tidsserierna standardiserades så att varje parameter, för varje station fick medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. Någon interpolering mellan värdena gjordes dock inte för kemidata.

Efter det att nivåserierna och de grundvattenkemiska tidsserierna standardiserats, gjordes en koppling mellan interpolerade nivådata och kemidata. Eftersom interpolerade nivådata fanns för varje dygn från mätningarnas början kunde en koppling göras för de datum då kemisk provtagning utförts. Denna koppling mellan nivå och kemidata medförde möjligheter att testa och jämföra samband grundvattnets nivå och kemi.

För varje kemisk parameter beräknades medelvärden för de olika nivåklasserna enligt klassindelningarna ovan. Syftet var främst att ge en grov bild av hur de olika kemiska parametrarna reagerar på förändringar i grundvattennivå.

Linjär regressionsanalys utfördes med grundvattennivå som oberoende variabel och de beroende variablerna (responsvariablerna) pH (lab), konduktivitet, järn, mangan, sulfat, alkalinitet, nitrat, klorid, natrium, kalium, kalcium, magnesium, TOC, ammonium, fluorid, aluminium, kadmium, krom, koppar, bly, zink, arsenik, nickel, kobolt, kvicksilver enligt följande:

$$c = k_1 + k_2 z + k_3 z^2$$

Där c = den kemiska responsvariabeln och z = grundvattennivån. Regressionsanalysen utfördes separat för varje kemisk parameter och sammantaget för samtliga stationer inom varje jordart. De riktningskoefficienter och intercept som erhölls vid regressionsanalysen användes för att utifrån de modellerade framtida nivåerna (perioden 2071–2100) enligt SGU-rapport 2010:12 beräkna en framtida grundvattenkemi för ett antal stationer (tabell 4). Kopplingen mellan de stationer med modellerade framtidsnivåer och kemistationer gjordes på samma sätt som kopplingen ovan. Beroende på avståndet mellan kemi och nivåstationer blev det nödvändigt att låta buffertzonen kring de modellerade nivåstationerna variera. Detta framgår av tabell 4.

RESULTAT

Samband mellan grundvattennivåer och grundvattenkemi

Sambandet mellan grundvattennivå och grundvattenkemi skilde sig markant mellan grundvattenmagasin som utgörs av morän och sand- och grus. Grundvatten i morän uppvisade signifikanta samband för de flesta kemiska parametrarna medan grundvatten i de grovkorniga jordarterna (sand–grus) uppvisade signifikanta samband för ett fåtal parametrar (tabell 5).

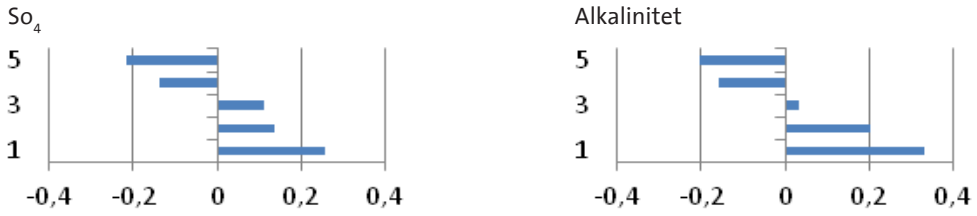
För morängrundvatten förekommer i huvudsak två typer av samband. I det ena fallet sjunker halterna linjärt med ökande nivåer (se exempel, fig. 7). I det andra fallet sjunker halterna upp till en viss nivå för att därefter öka när grundvattennivån närmar sig markytan (se exempel, fig. 8) vilket kan iakttas i de kvadratiska sambanden i tabellen ovan. Även om sambanden är signifikanta är de statistiskt sett svaga med låga förklaringsgrader. Exempelvis har R^2=0,04 noterats för magnesiumhalter i morängrundvatten vilket är den högsta förklaringsgraden (fig. 9).

Tabell 4. Nivå- och stationsnummer som användes för prediktion av framtida grundvattenkemi.

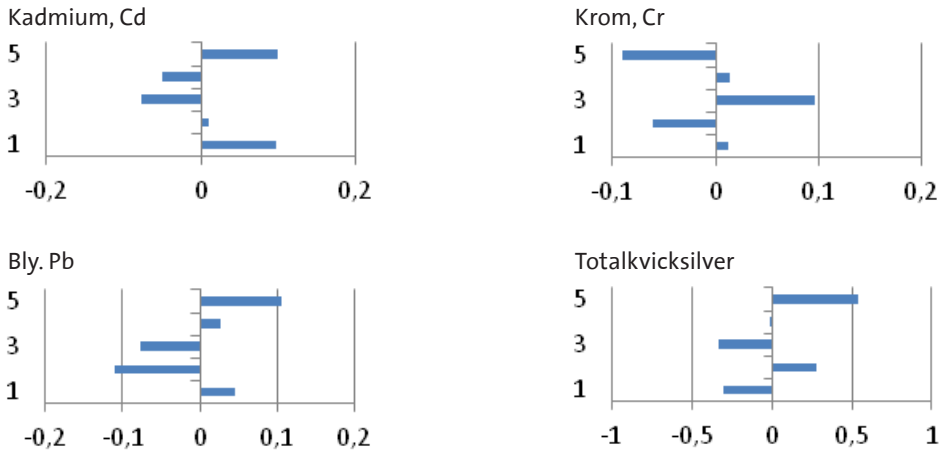
Nivåstation		Kemistation		Kopplingsavstånd (km)
Område	Station	Område	Station	
15	8	54	18	40
15	8	14	15	40
17	9	2 300	2	40
17	9	16	71	40
17	9	16	102	40
72	24	5	13	40
32	22	2 000	2	40
42	8	42	13	40
64	1	65	7	40
66	6	84	101	40
26	6	26	24	40
17	9	2 300	2	40
16	18	16	71	40
18	5	1 110	2	40
72	24	72	101	40
48	23	47	1	40
68	5	68	9	40
37	34	2 100	1	50
15	8	74	1	60
37	48	2 100	1	60
32	22	2 000	2	70
4	9	900	1	71

Tabell 5. Samband mellan grundvattennivå och grundvattenkemi för morän och grovkorniga jordarter (sand/grus). S =signifikant på 5procentnivån. – = signifikanta samband saknas.

Parameter	Grundvatten i morän		Grundvatten i sand- och grusavlagringar	
	Linjärt samband	Kvadratiskt samband	Linjärt samband	Kvadratiskt samband
pH (lab)	S	S	-	-
Konduktivitet	S	-	-	-
Järn	S	-	-	-
Mangan	S	S	S	-
Sulfat	S	-	S	S
Alkalinitet	S	-	S	-
Nitrat	S	-	S	-
Klorid	S	-	-	-
Natrium	S	-	S	-
Kalium	S	-	S	-
Kalcium	S	-	-	-
Magnesium	S	-	-	-
TOC	-	-	-	-
Ammonium	S	S	-	-
Fluorid	S	-	-	-
Aluminium	S	-	S	S
Kadmium	-		-	-
Krom	-	S	-	-
Koppar	-	S	-	-
Bly	-	S	-	-
Zink	S	-	-	-
Arsenik	-	-	-	-
Nickel	-	S	-	-
Kobolt	-	S	S	S
Kvicksilver	-	S	-	-



Figur 7. Samband mellan koncentration och grundvattennivå för sulfat och alkalinitet i morängrundvatten. Klassindeladade och standardiserade värden. Exempel på linjärt samband som visar lägre koncentrationer vid höga grundvattennivåer. Ökande grundvattennivåer uppåt i figuren.



Figur 8. Samband mellan koncentrationer och grundvattennivå för kadmium, krom, bly och kvicksilver i morängrundvatten. Klassindelade och standardiserade värden. Exempel på kvadratiska samband, men åt olika håll. Kadmium med de högsta och krom med de lägsta koncentrationerna vid höga grundvattennivåer. Ökande grundvattennivåer uppåt i figuren.

Figur 9. Samband mellan grundvattennivå i morängrundvatten och pH (lab) samt magnesiumkoncentrationerna. Klassindelade och standardiserade värden. Ökande grundvattennivåer uppåt i figuren.

De kvadratiska sambanden med stigande halter när grundvattennivån närmar sig markytan beror troligtvis på att metaller som koppar, bly, kadmium och kvicksilver, som luftdeponerat lagras i de övre horisonterna i jordmånsprofilen frigörs då grundvattnet vid höga nivåer flödar genom dessa. Arsenik och krom, som kan förekomma såväl som an- och katjoner har däremot de lägsta halterna vid höga grundvattennivåer. Det beror troligtvis på att de oxiderade formerna av arsenik och krom föreligger som anjoner i ytnära grundvatten, vilket medför att de aldrig lagras upp i ytliga markskikten.

Resultaten av sambanden mellan medelkoncentrationerna per nivåklass för grundvattenmiljöerna morän och sand- och grusavlagringar ger en bra bild över vilka fysikaliska eller

kemiska parametrar som visar samband med grundvattnets nivåläge. Resultaten är presenterade i tabell 5 och visualiserade i figurerna 7 till 9. Endast ett fåtal kemiska parametrar i grundvatten i sand- och grusavlagringar visar ett samband med grundvattennivå. Det är i enlighet med det hypotetiska resonemanget i bakgrundsavsnittet. Vi valde därför att inte bearbeta dessa data vidare, utan koncentrera oss på sambanden mellan nivå och kemi i moränrundvatten. Nedan ges dock exempel på relationer mellan nivå och kemi i grundvatten i sand- och grusavlagringar, som trots allt är signifikanta. De jämförs med nivå och kemirelationerna i moränrundvatten.

För att få ett matematiskt uttryck för relationen mellan koncentrationer och grundvattennivå utfördes korrelationsanalys med individuella värden enligt metod angiven ovan. Jämför graferna i figurerna 7–10 med de synbarligen kaotiska punktsvärmarna i figur 11. Den stora mängden data medför att sambanden är signifikanta, men styrkan är mycket liten.

Den vanligaste relationen är linjär med sjunkande koncentrationer vid ökande grundvattennivåer. För aluminium är det tvärtom då det är starkt pH-beroende. Tungmetallerna är bäst kvadratiskt anpassade till grundvattennivåerna. För krom är parabelns skenklar uppåtriktade medan de är nedåtriktade för de övriga metallerna. Kvicksilver har de mest accentuerade koncentrationsförändringarna per enhet förändring i grundvattennivå. Zink är ett undantag bland tungmetallerna och ansluter sig till den vanligaste linjära relationen med negativ riktningskoefficient. Data om resultat av den utförda linjära regressionsanalysen framgår av tabell 6.

De erhållna riktningskoefficienterna och intercepten gör att de ekvationer som uttrycker de linjära sambanden mellan koncentrationer och grundvattennivåer kan formuleras för kemisk och fysikalisk parameter. De ekvationer som använts för beräkningar av de framtida grundvattenkemiska tillstånden är således:

$$Konc_{mg} = z \times -0{,}19761+0{,}0251$$

$$Konc_{Na} = z \times -0{,}18396+0{,}02099$$

$$Konc_{Alkalinitet} = z \times -0{,}18903+0{,}024214$$

$$Konduktivitet = z \times -0{,}1863+0{,}023$$

$$Konc_{K} = z \times -0{,}16802+0{,}019333$$

$$Konc_{(SO4)} = z \times -0{,}15756+0{,}018666$$

$$Konc_{Ca} = z \times -0{,}16164+0{,}020055$$

$$\mathrm{pH} = z \times -0{,}12906+0{,}01481$$

$$Konc_{F} = z \times -0{,}11202+0{,}014639$$

$$Konc_{Cl} = z \times -0{,}07561+0{,}0095$$

$$Konc_{Al} = z \times 0{,}067878-0{,}00953$$

$$Konc_{Mn} = z \times -0{,}0659+0{,}007911$$

$$Konc_{(NH_4)} = z \times -0{,}06036+0{,}006181$$

$$Konc_{(NH_4)} = z \times -0{,}06954+0{,}011249$$

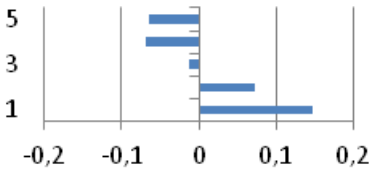
$$Konc_{(NO_3)} = z \times -0{,}04178+0{,}004225$$

z är dygnsmedelvärde beräknat på hela trettioårsperioden 2071–2100.

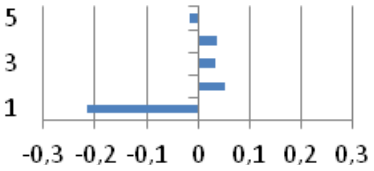
Motsvarande data avseende resultaten av den kvadratiska regressionsanalysen framgår av tabell 7.

Grundvatten i sand- och grusavlagringar

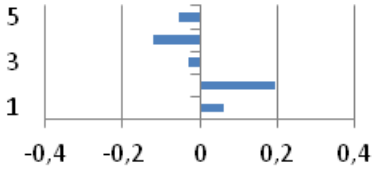
Alkalinitet



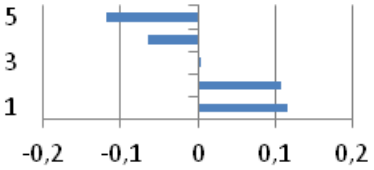
SO4



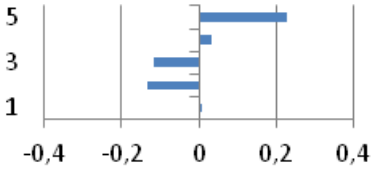
Natrium, Na



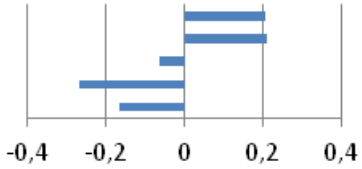
Kalcium, K



Aluminium, Al

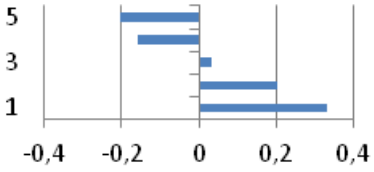


Kobolt, Co

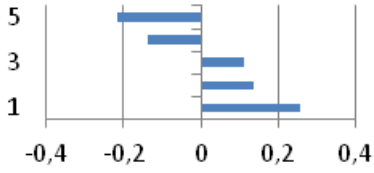


Grundvatten i morän

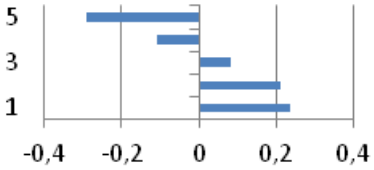
Alkalinitet



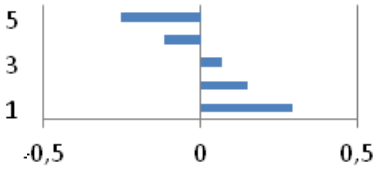
So4



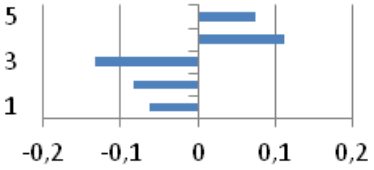
Natrium, Na



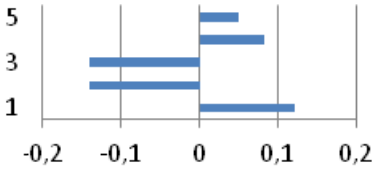
Kalcium, K



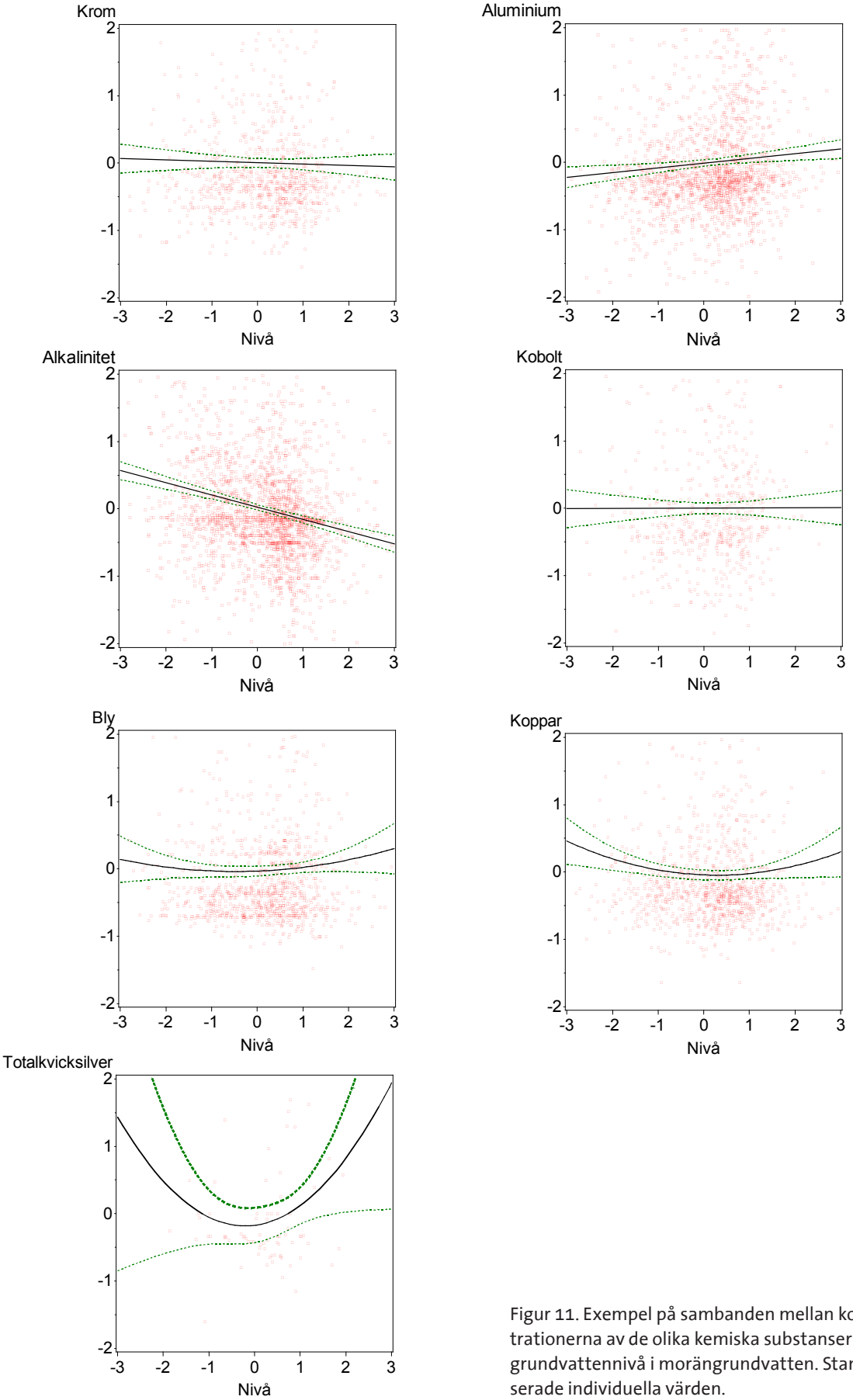
Aluminium, Al



Kobolt, Co



Figur 10. Jämförelser mellan grundvatten i sand- och grusavlagringar och i morän avseende relationerna mellan grundvattennivåintervall och medelkoncentrationerna för de få ämnen som i sand- och grusgrundvatten uppvisar ett signifikanta samband. Nitrat uppvisar också ett signifikant samband, men visas inte i figuren.



Figur 11. Exempel på sambanden mellan koncentrationerna av de olika kemiska substanserna och grundvattennivå i morängrundvatten. Standardiserade individuella värden.

Tabell 6. Resultaten av regressionsanalysen med avseende på linjära samband.

Parameter	K_0 (intercept)	K_1 (riktningskoefficient)
Magnesium	0,0251	-0,19761
Natrium	0,02099	-0,18396
Alkalinitet	0,024214	-0,18903
Konduktivitet	0,022688	-0,1863
Kalium	0,019333	-0,16802
Sulfat	0,018666	-0,15756
Kalcium	0,020055	-0,16164
pH	0,01481	-0,12906
Fluor	0,014639	-0,11202
Klor	0,0095	-0,075608
Aluminium	-0,00953	0,067878
Mangan	0,007911	-0,065904
Ammoniak	0,006181	-0,060364
Zn	0,011249	-0,069541
Nitrat	0,004225	-0,041778

Tabell 7. Resultaten av regressionsanalysen med avseende på parabelsamband.

Parameter	K_0 (intercept)	K_1 (linjärt)	K_2 (kvadratisk)
Cu	-0,0526	-0,014509	0,052968
Hgtot	-0,23553	0,13576	0,29882
Ni	-0,06347	-0,01731	0,072723
Co	-0,06263	0,020356	0,064714
Cr	0,05005	-0,023965	-0,04632
Pb	-0,04207	0,039262	0,034387

De ekvationer som uttrycker de kvadratiska sambanden mellan koncentrationer och grundvattennivåer och som använts för beräkningar av de framtida grundvattenkemiska tillstånden är:

$$Konc_{Cu} = z^2 \times 0{,}052968 + z \times -0{,}01451 - 0{,}0526$$

$$Konc_{(Hgtot)} = z^2 \times 0{,}29882 + z \times 0{,}13576 - 0{,}23553$$

$$Konc_{Ni} = z^2 \times 0{,}072723 + z \times -0{,}01731 - 0{,}06347$$

$$Konc_{Co} = z^2 \times 0{,}064714 + z \times 0{,}020356 - 0{,}06263$$

$$Konc_{Cr} = z^2 \times -0{,}04632 + z \times -0{,}02397 + 0{,}05005$$

$$Konc_{Cr} = z^2 \times 0{,}034387 + z \times 0{,}039262 - 0{,}04207$$

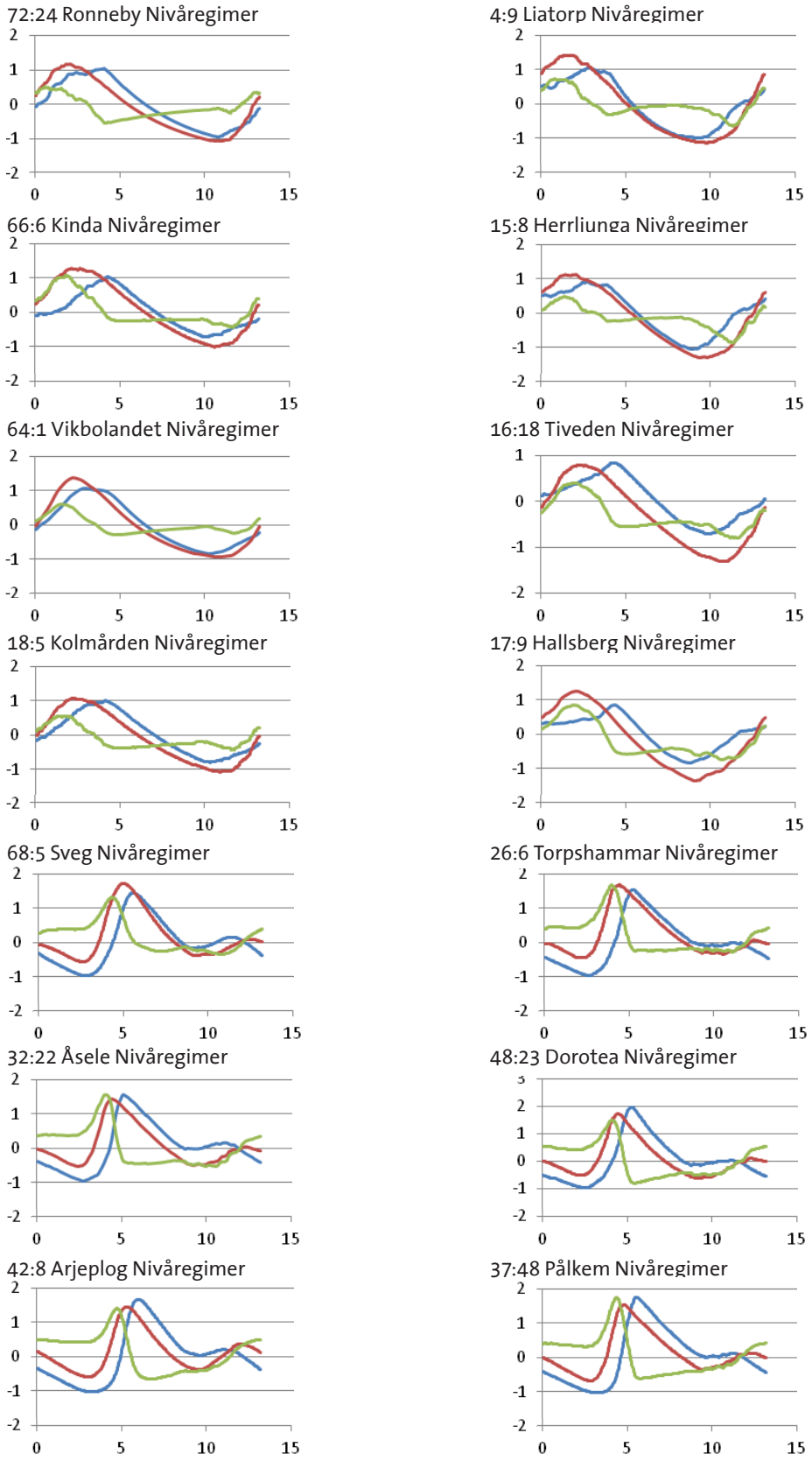
Beräkningar av framtida grundvattenkemiska tillstånd och variationer

Den grundvattennivåberoende kemiska förändringen uttryckt som årsmedelvärden mellan 30-årsperioden 1991–2020 och 30-årsperioden 2071–2100 samt inomårsvariationen i koncentrationerna bygger på de prognosticerade nivåregimerna presenterade i figurerna 3 och 4 samt ytterligare åtta stationer och de beräknade relationerna mellan de olika kemiska och fysikaliska parametrarnas mätvärden och grundvattennivåer. I figur 12 presenteras resultaten för 14 områden. I figuren visas de mätvärdesbaserade och simulerade årsregimerna för perioden 1991–2020 och de prognosticerade för perioden 2071–2100 och skillnaden mellan dessa, som är grunden för de kemiska koncentrationsförändringarna. Beräkningarna utgår från de verkliga mätresultaten från stationer som representerar respektive område från norr till söder Pålkem, Arjeplog, Dorotea, Åsele, Torpshammar, Sveg, Hallsberg, Kolmården, Tiveden, Vikbolandet, Herrljunga, Kinda, Ljungby och Ronneby. Årsregimerna för perioden 1991–2020 bygger på simulering med GRV-modellen där modellen verifieras (kalibreras) mot uppmätta data var fjortonde dag för respektive station under perioden 1991–2009.

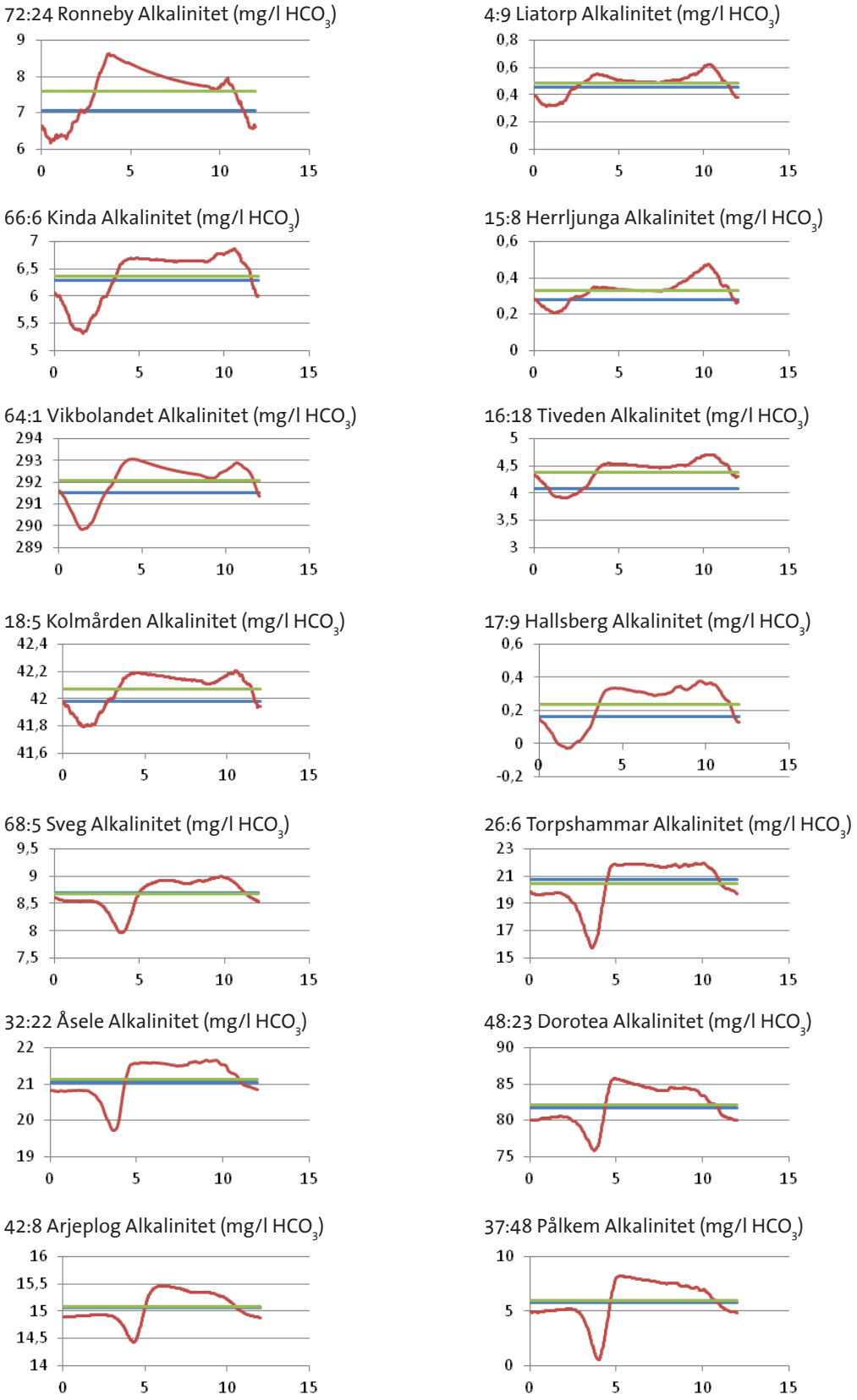
På årsbasis är förändringarna i grundvattennivåer mycket små (tabell 8). I själva verket är det fråga om högst någon centimeter. De presenterade förändringarna hänför sig till en amplitud som är normaliserad. De verkliga amplituderna ligger i storleksordningen 1,5–2,5 m. Förändringarna i ämnens koncentrationer är emellertid beroende av hur nivåernas årsregimer förändras, bl.a. hur extremerna utvecklas.

Gemensamt för alla predikterade regimer är att första nivåmaximum tidigareläggs på grund av mildare vintrar. Längst i norr (Arjeplog och Pålkem) med cirka en månad från juni till maj. I söder blir förskjutningen i tidigareläggningen längre. I de fyra nordliga områdena kommer den framtida årstidsregimen att innebära en utslätning med mindre amplituder än idag, medan de sydligare områdena innebär såväl ”nya” nivåmax- som nivåminvärden. Förskjutningen av regimkurvorna innebär att vi kommer att ha högre medelgrundvattennivåer i början av året i hela landet. Den stora skillnaden är att i Norrland kommer de högre grundvattennivåerna än idag att vara ungefär halva året, medan de under resten av året kommer att vara lägre än idag. I södra Sverige varar de högre nivåerna bara i två till tre månader följt av en lång period med lägre nivåer än idag.

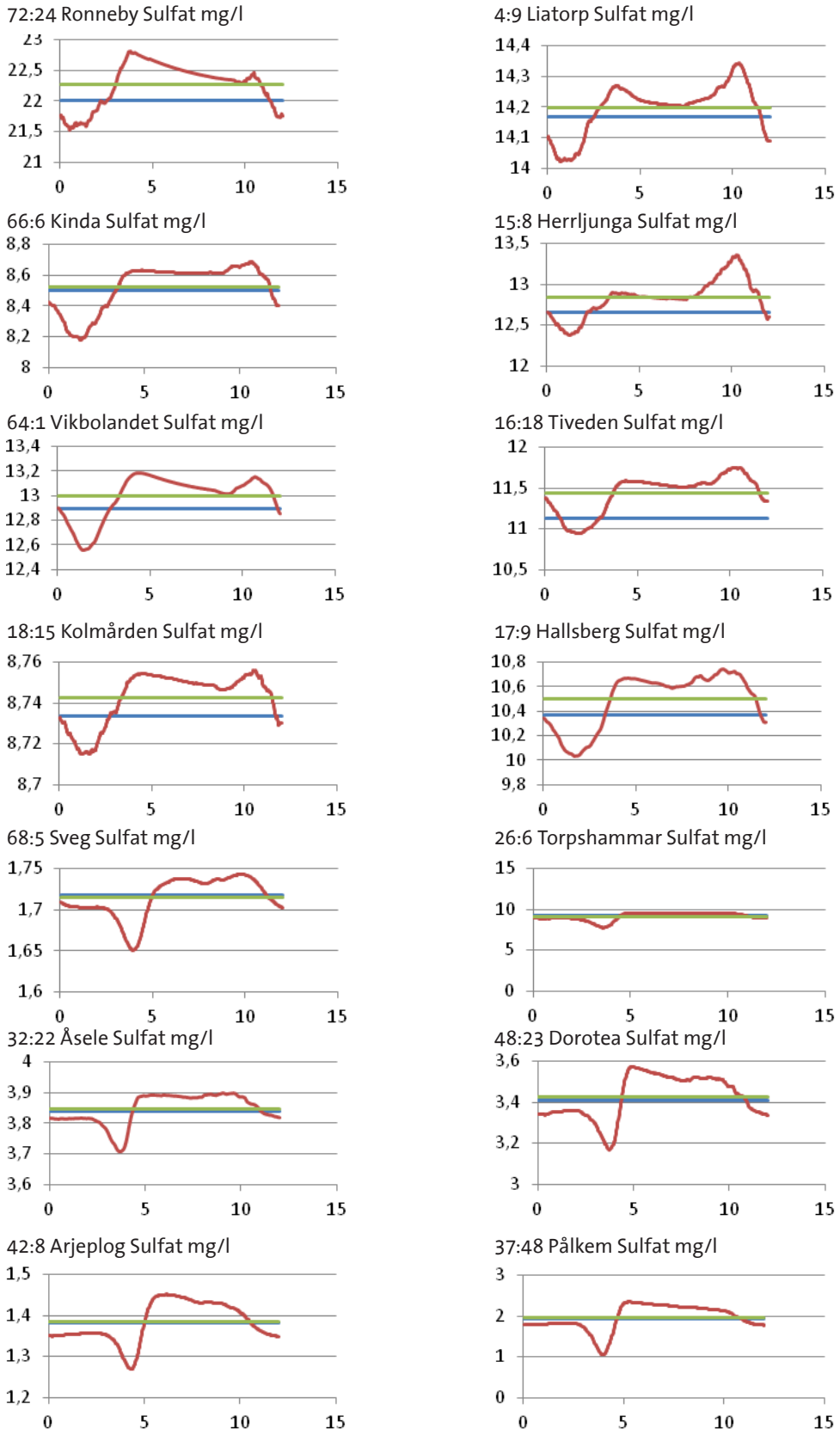
När det gäller förändringarna i olika kemiska ämnens koncentrationer som ett resultat av dessa klimatgenererade förändringar hos grundvattennivåer kan de bli högst varierande. De presenteras nedan för ett urval ämnen, som uppträder under olika betingelser. För sådana parametrar som är starkt beroende av vittringprocesser, som t.ex. alkalinitet är uppehållstiden en viktig faktor och vid låga nivåer består grundvattenpacken av en större andel vatten med lång omsättningstid än vid episoder med höga nivåer (fig. 13 och tabell 7). Sulfat i grundvatten har flera olika källor som luftdeposition, men även geologiska ursprung och halterna kan dessutom variera högst betydligt genom redoxprocesser. Ett enkelt grundvattennivåberoende är därför ingen självklarhet. Förändringarna i sulfathalterna presenteras i figur 14. De metaller som lagras upp i markprofilernas humus- och anriktningsskikt som t.ex. bly och kvicksilver mobiliseras vid högvattenepisoder, medan halterna vid låga nivåer kan bli mycket låga. Detta illustreras av graferna i figurerna 15 och 17 och siffrorna i tabell 7. Krom som vid oxiderande förhållanden uppträder som anjon uppvisar således helt motsatt koncentrationsutveckling vid grundvattennivåförändringar.



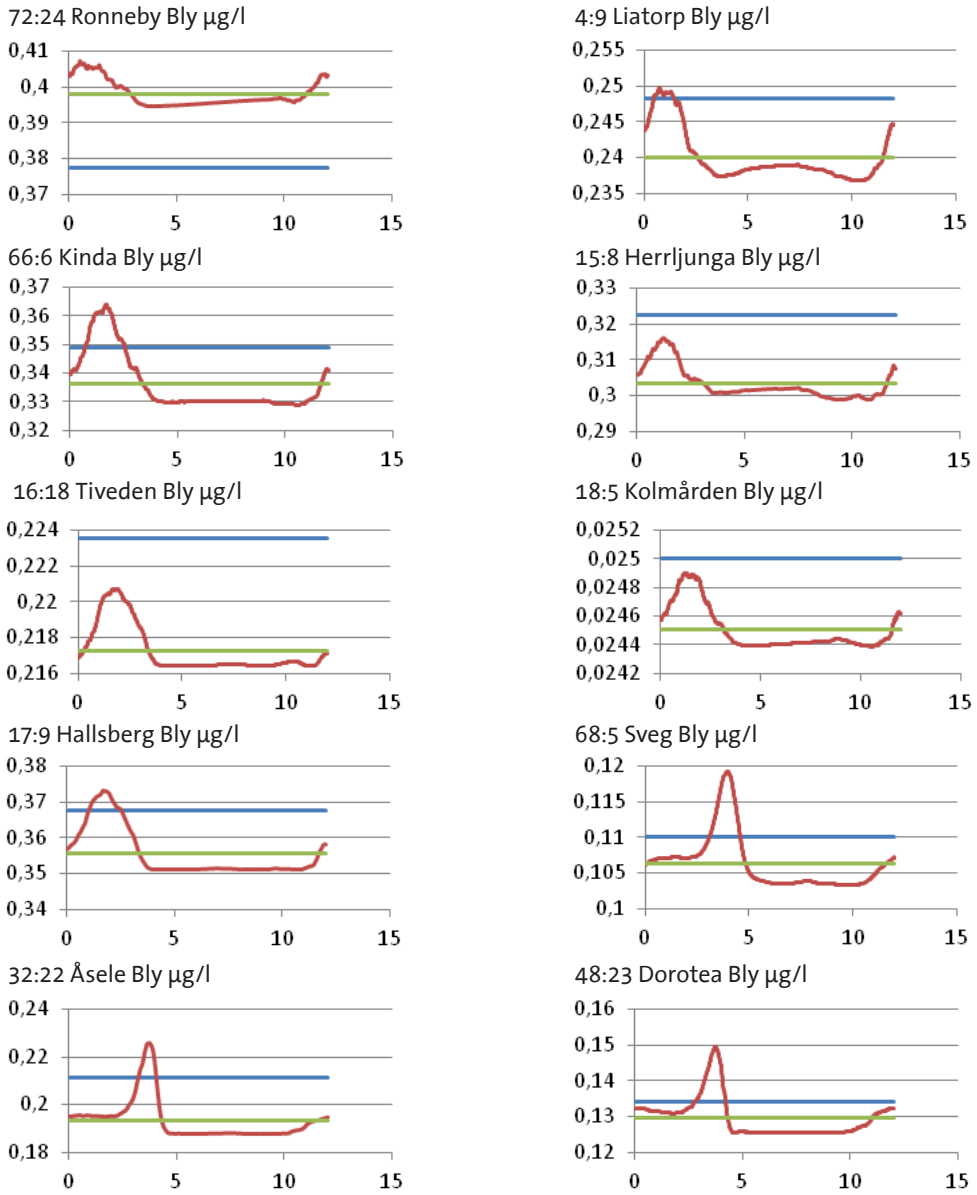
Figur 12. Normaliserade grafer över medelårstidsvariationen vid de fjorton grundvattennivåstationerna i moränmagasin dels för 30-årsperioden 1991–2020 (markerat med blått) och för den prognosticerade perioden 2071–2100 (rött) och skillnaderna mellan dessa (grönt). Dessa skillnader ger upphov till skillnader i ämnenas koncentrationer. Perioden 1991–2012 är predikterad GRV-modellen. Mätta grundvattennivåer t.o.m. 2009 har använts för kalibrering av modellen.



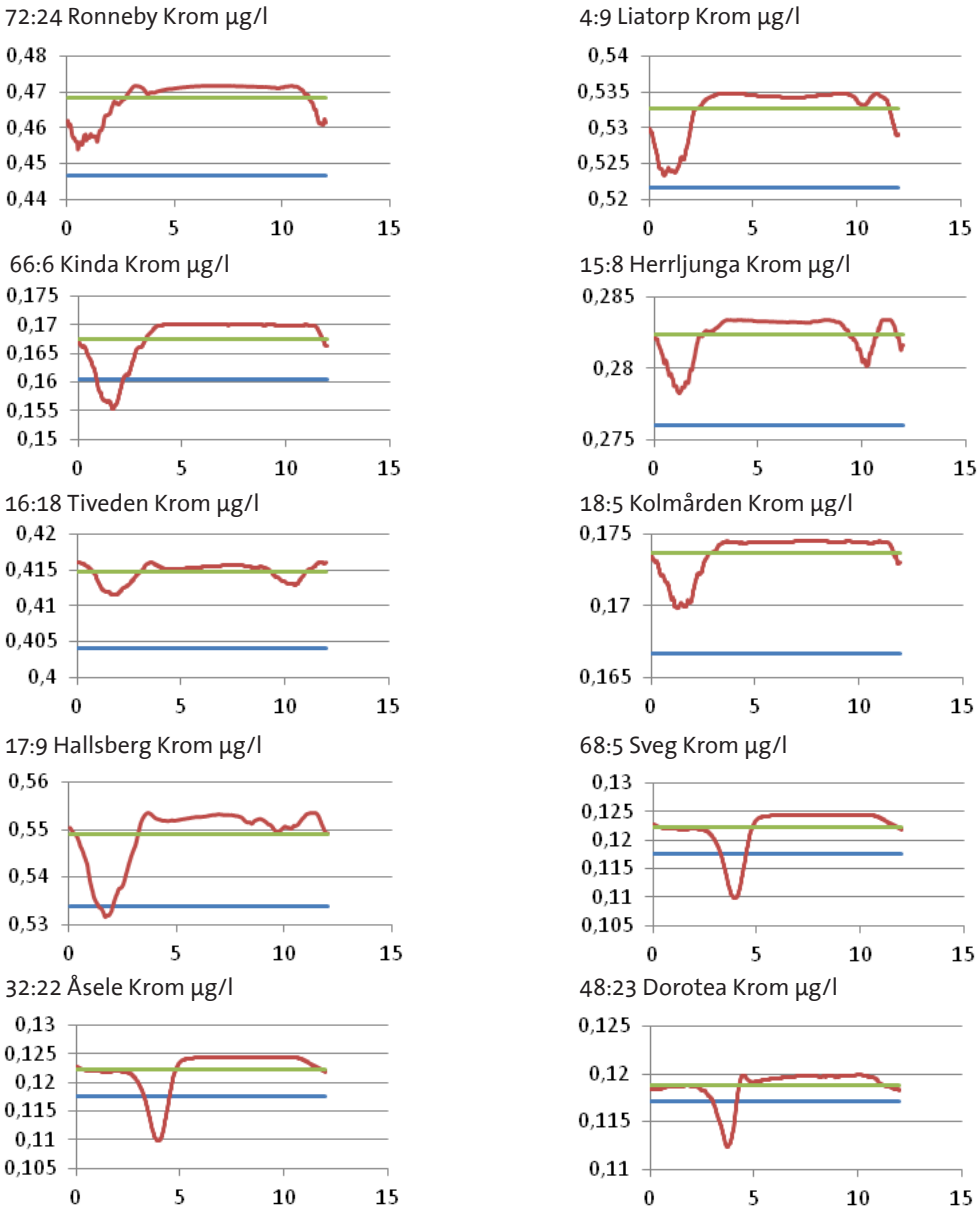
Figur 13. Beräknade medelhalter i alkalinitet angivet som mg/l HCO3 för perioden 1991–2020 (markerat med blått) och för perioden 2071–2100 (grönt) och medelårsvariationer för perioden 2071–2100 (rött) i moräng-rundvatten i fjorton områden i Sverige. Y-axeln anger halter i mg/l och X-axeln årets månader.



Figur 14. Beräknade sulfatmedelhalter för perioden 1991–2020 (markerat med blått) och perioden 2071–2100 (grönt) och medelårsvariationer för perioden 2071–2100 (rött) i morängrundvatten i fjorton områden i Sverige. Y-axeln anger halter i mg/l och X-axeln årets månader.



Figur 15. Beräknade blymedelhalter för perioden 1991–2020 (blått) och perioden 2071–2100 (grönt) och medelårsvariationer under perioden 2071–2100 (rött) i morängrundvatten i några områden i Sverige. Y-axeln anger halter i µg/l och X-axeln årets månader.

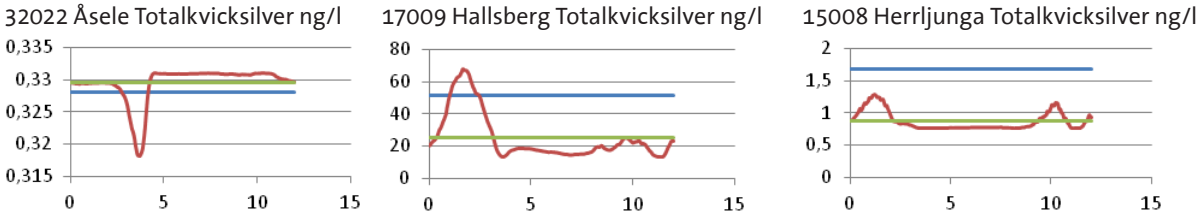


Figur 16. Beräknade krommedelhalter för perioden 1991–2020 (blätt) och perioden 2071–2100 (grönt) och medelårsvariationer under perioden 2071–2100 (rött) i morängrundvatten i några områden i Sverige. Y-axeln anger halter i µg/l och X-axeln årets månader.

I figur 16 visas exempel på en metall (krom), som uppför sig helt annorlunda än kvicksilver och bly, dvs. halterna ökar vid lägre grundvattennivåer.

Den procentuella förändringen i koncentrationer hos ämnen mellan perioderna 1991–2020 och 2071–2100 är presenterande i en sammanfattande tabellerna 8 och 9.

Förändringarna är blygsamma för de flesta ämnen med undantag för alkalinitet och tungmetaller. pH och klorid förändras mindre än en procent. Man får dock betänka att pH är ett logaritmiskt mått, så förändringen i vätejonkoncentrationen är betydligt större än vad siffrorna i tabell 8 anger för pH. De flesta huvudkonstituenter, näringsämnen, aluminium



Figur 17. Beräknade medelhalter totalkvicksilver för perioden 1971–2000 (blått) och perioden 2071–2100 (grönt) och medelårsvariationer under perioden 2071– 2100 (rött) i morängrundvatten i tre områden i Sverige. Y-axeln anger halter i ng/l och X-axeln årets månader. Lägg märke till de korta accentuerade koncentrationstopparna, som hänger samman med höga grundvattennivåer under tidig vår och under höst i Herrljunga, lite senare höga nivåer under våren i Hallsberg och en kort distinkt vårtopp i april i Åsele.

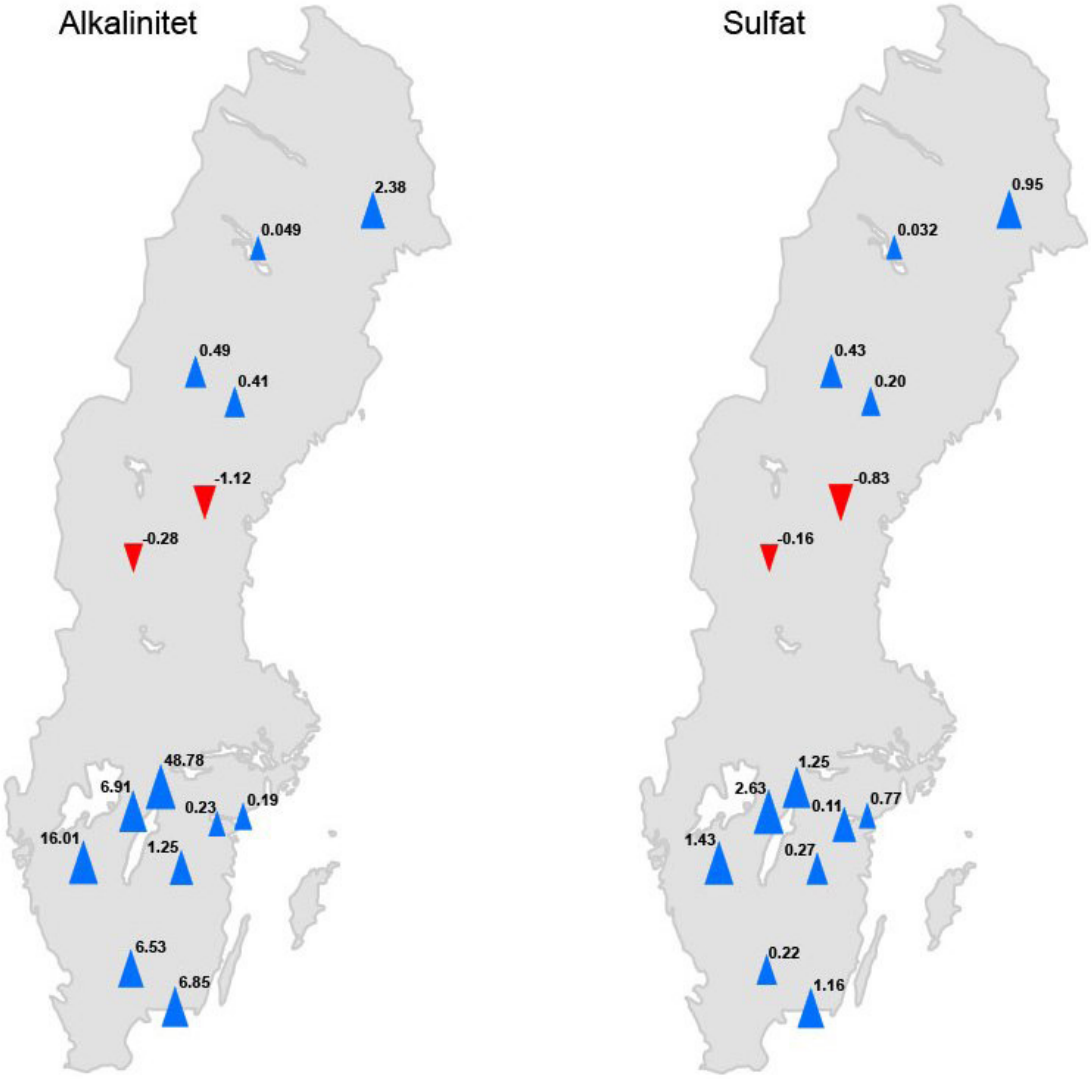
Tabell 8. Sammanfattning av den procentuella förändringen i nivåer och i halter av utvalda grundämnen, näringämnen och konduktivitet som en funktion av klimatgenererade grundvattennivåförändringar vid fjorton platser i Sverige i moränmagasin. Förändringen avser skillnaderna mellan 30-årsperioden 1991–2020 och 30-årsperioden 2071–2100.

Station	Område	Förändring i procent										
		Nivå	kond	Alk	SO_4	Cl	NO_3	NH4	Na	K	Ca	Mg
72:24	Ronneby	-,091	+5,68	+6,85	+1,16	+,51	+1,49	+3,77	+,74	+3,2	+1,96	+1,61
4:9	Liatorp	-,013	+,21	+6,5	+,22	+,16	+,80	+1,25	+,25	+1,1	+,69	+,51
66:6	Kinda	+,051	+,43	+1,25	+,27	+,52	+,31	+,95	+,56	+,27	+,74	+,33
15:8	Herrljunga	-,13	+1,5	+19,0	+1,43	+,92	+1,7	+2,02	+2,42	+1,5	+2,06	+2,5
64:1	Vikbolandet	-,023	+,37	+,19	+,77	+,25	+,48	+1,01	+,28	+,48	+,17	+,46
16:18	Tiveden	-,32	+1,82	+6,91	+2,63	+,80	+3,03	+4,24	+1,39	+2,1	+3,7	+3,57
18:5	Kolmården	-,10	+,24	+,23	+,11	+,29	+,54	+,86	+,33	+,98	+,20	+,17
17:9	Hallsberg	-,18	+1,24	+48,8	+1,25	+,81	+1,33	+2,5	+1,07	+2,1	+4,08	+2,0
68:5	Sveg	+,17	-,17	-,28	-,16	-,11	-,78	-1,25	-,14	-,35	-,38	-,18
26:6	Torpshammar	+,20	-,78	-1,1	-,83	-,27	-1,48	-2,48	-,87	-,81	-,90	-,83
32:22	Åsele	+,035	+,27	+,41	+,20	+,19	+,26	+,50	+,58	+,40	+,21	+,39
48:23	Dorotea	+,034	+,45	+,49	+,43	+,36	+,20	+,61	+,33	+,38	+,42	+,50
42:8	Arjeplog	+,11	+,027	+,049	+,032	+,050	-,086	-,13	+,002	+,01	+0,04	+,056
37:48	Pålkem	+,08	+,80	+2,38	+,95	+,32	+,08	+,24	+,43	+,45	+1,18	+,79

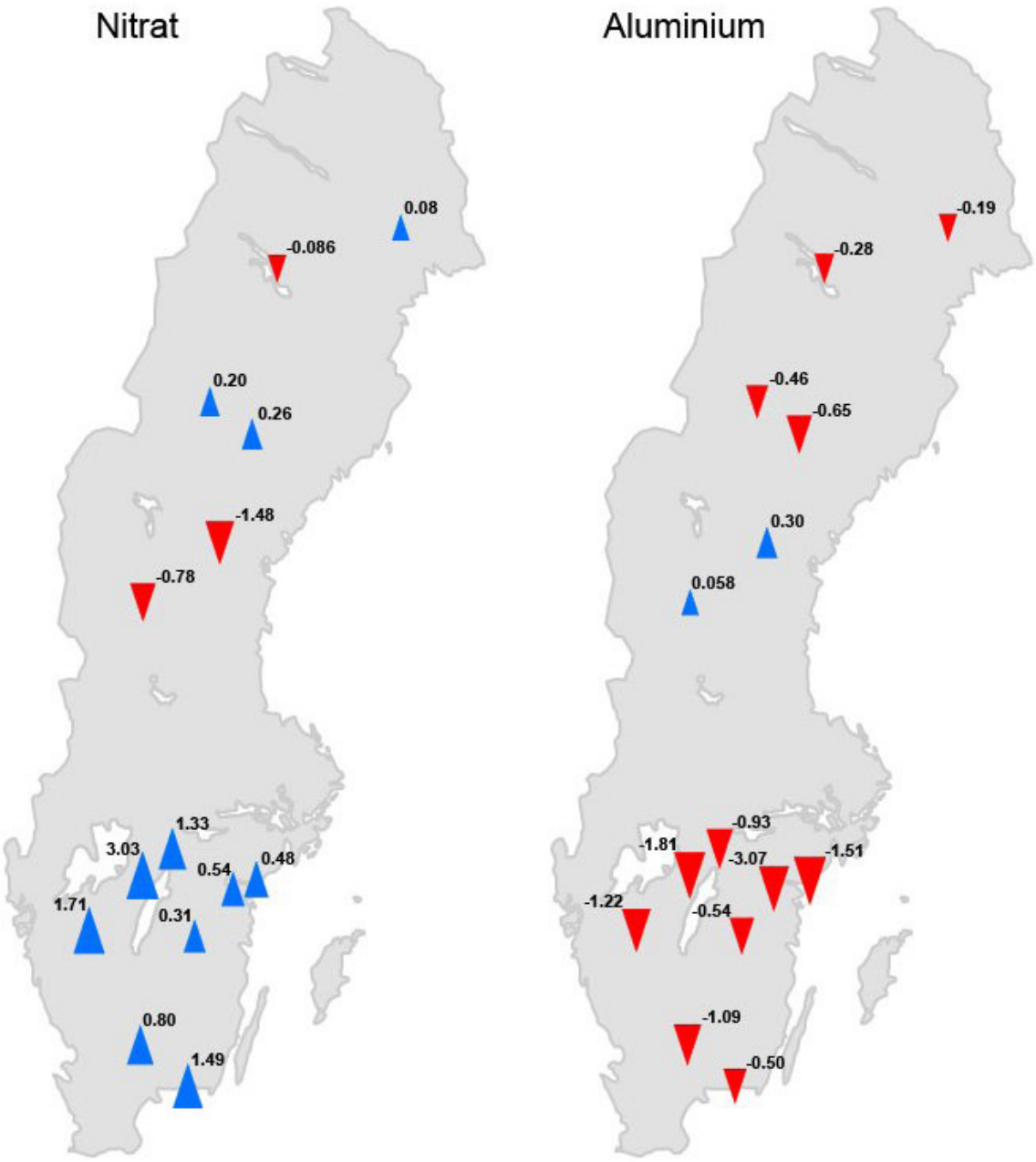
Tabell 9. Sammanfattning av den procentuella förändringen i nivåer, pH, i koncentrationer av aluminium och tungmetaller som en funktion av klimatgenererade grundvattennivåförändringar vid fjorton platser i Sverige i moränmagasin. Förändringarna avser skillnaderna mellan 30-årsperioden 1991–2020 och 30-årsperioden 2071–2100.

Station	Område	Förändring i procent										
		Nivå	pH	Al	Cu	Co	Cr	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
72:24	Ronneby	-,09	+,24	-,50	+3,04	-8,17	+4,6	+2,74	-0,99	+5,21	+3,96	-
4:9	Liatorp	-,013	+,09	-1,09	-3,91	-1,44	+2,08	+1,85	-6,11	-3,46	+3,55	-
66:6	Kinda	+,051	+,048	-,54	-4,9	-6,04	+4,27	+,52	-8,21	-3,79	+1,35	-
15:8	Herrljunga	-,13	+,28	-1,2	-6,43	-3,9	+2,24	+,78	-3,89	-6,28	+0,5	-48,07
64:1	Vikbolandet	-,023	+,029	-1,51	-	-	-	+0,64	-	-	-	-
16:18	Tiveden	-,33	+,32	-1,8	-1,07	-5,86	+2,55	+5,1	-0,93	-2,89	+2,08	-
18:5	Kolmården	-,10	+,03	-3,1	-2,6	-13,5	+4,05	+2,96	-2,15	-2,03	+1,4	-
17:9	Hallsberg	-,18	+,18	-,93	-2,72	-1,08	+2,75	+1,74	-0,97	-3,42	+2,82	-50,7
68:5	Sveg	+,17	-,03	+,058	-6,26	-1,88	+3,69	-,61	-4,11	-3,45	-,044	-
26:6	Torpshammar	+,20	-,08	+,30	-	-	-	-,63	-	-	-	-
32:22	Åsele	+,035	+,018	-,65	-8,61	-5,46	+0,43	+,87	-1,67	-9,29	+3,64	-20,6
48:23	Dorotea	+,034	+,036	-,46	-8,84	-1,91	+1,41	+,74	-2,55	-3,52	+1,72	-
42:8	Arjeplog	+,11	+,001	-,28	-3,71	-1,09	+1,92	+0,15	-1,38	-3,21	+0,40	
37:48	Pålkem	+,08	+,03	-,19	-2,95	-9,19	+2,7	-	-3,68	-3,67	+0,43	-

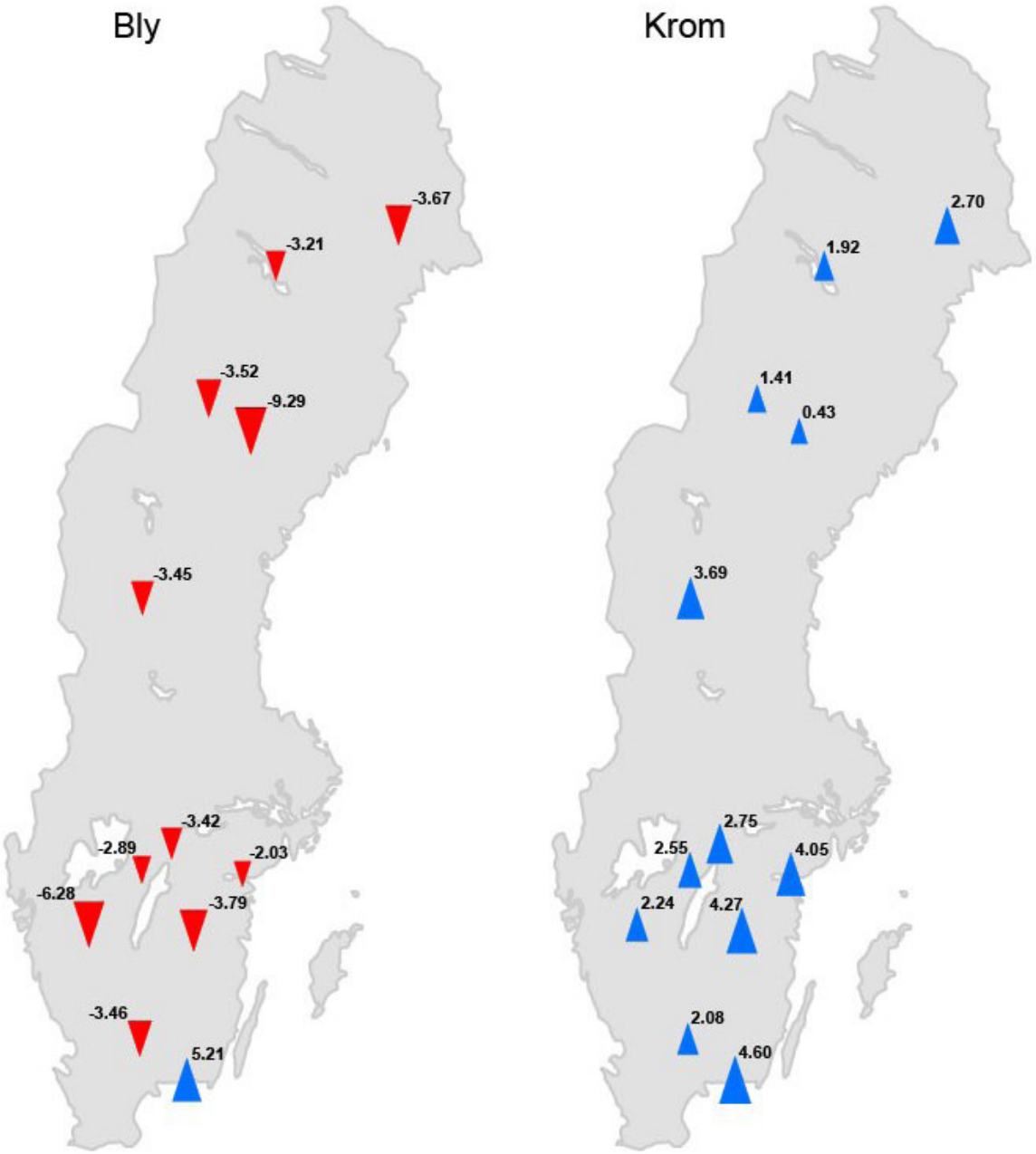
och krom förändras högst fem procent, medan den elektriska konduktiviteten och tungmetallerna mangan, koppar, nickel och bly förändras upp till tio procent. Kobolt är det enda ämnet som förändras upp till ca 15 procent. Alkaliniteten förändras upp till 50 procent enligt dessa beräkningar. Förändringen i totalkvicksilver sticker ut genom att förändringen vid de tre platserna där den beräknats, alla ligger över 20 procent med en maximal förändring på ca 51 procent. I kartorna i figurerna 18–22 är förändringarna illustrerade med pilar för några av de ämnen där förändringarna är noterbara. Det bör framhållas att de beräknade förändringarna bara bygger på grundvattennivåberoendet hos de kemiska parametrarna. Andra klimatbetingade faktorer som förändringar i jämviktskonstanter och kinetik har inte beaktats i dessa beräkningar.



Figur 18. Procentuella förändringarna i till vänster alkalinitet och till höger koncentrationen av sulfat från 30-årsperioden 1991–2020 till 30-årsperioden 2071–2100. Något lägre medelnivåer, men också lägre maximala grundvattennivåer ger högre alkaliniteter i södra och norra Sverige, medan de i mellersta delen av landet kommer att sjunka marginellt . Det är egentligen bara för alkaliniteten man kan notera förändringar över fem procent i delar av Götaland och södra Svealand. De mycket små predikterade nivåförändringarna vid de utvalda stationerna ger mycket marginella förändringar i sulfathalterna. Observera att skalorna på kilarna är anpassade för varje karta, för att informationen från en del stationer ska kunna synas.

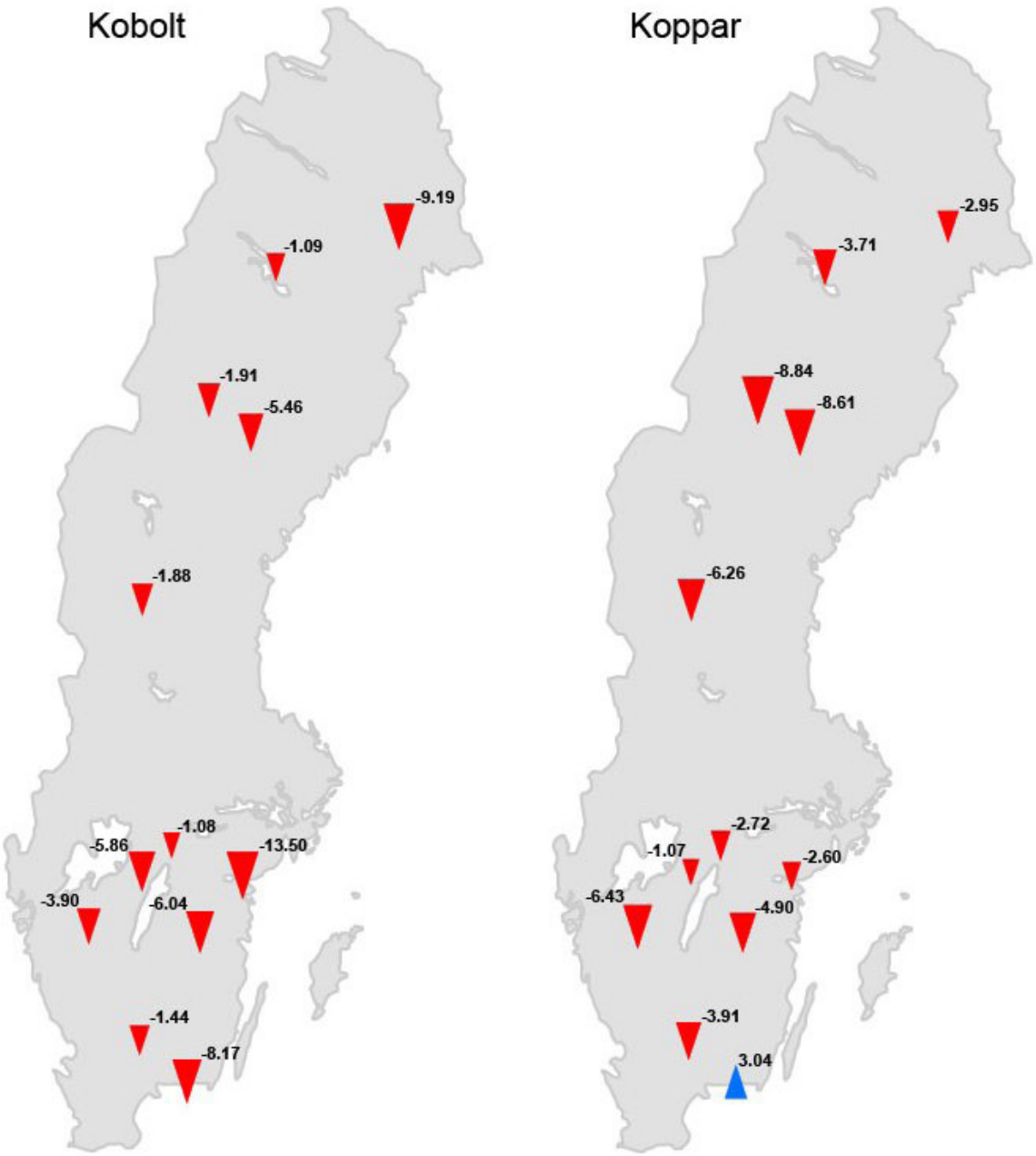


Figur 19. Procentuella förändringar i koncentrationerna av nitrat (t.v.) och aluminium (t.h) från 30-årsperioden 1991–2020 till 30-årsperioden 2071–2100. Lägre medelnivåer, men också lägre maximala grundvattennivåer ger marginellt högre nitrathalter i Götaland och södra Svealand, som mest en ökning med drygt tre procent. Aluminium går i lösning vid låga pH-värden. I områden där pH ökar kommer aluminium att uppträda i lägre halter. Förändringarna är mycket små. Som mest sjunker halten med ca tre procent. Observera att skalorna på kilarna är anpassade för varje karta, för att informationen från en del stationer ska kunna synas.



Figur 20. Procentuella förändringar i koncentrationerna för bly (t.v.) och krom (t.h) från 30-årsperioden 1991–2020 och 30-årsperioden 2071–2100. Bly lagras luftdeponerat upp i övre jordmånsprofilen och tillförs morängrundvattnet då nivåerna är så höga att det kommer i kontakt med de metallupplagrade skikten. Lägre medelnivåer, men också lägre maximala grundvattennivåer ger lägre blyhalter med en ganska jämnt fördelad procentuell nedgång, som mest drygt nio procent lägre årsmedelvärde. Kromets helt motsatta relation till grundvattennivåer, gör att kromhalterna ökar i ungefär samma storleksordning som blyhalterna minskar. Den kraftigaste kromökningen ligger på 4,6 procent. Observera att skalorna på kilarna är anpassade för varje karta, för att informationen från en del stationer ska kunna synas.

Figur 21. Procentuella förändringar i koncentrationerna för kvicksilver (t.v.) och nickel (t.h.) från 30-årsperioden 1991–2020 till 30-årsperioden 2071–2100. Kvicksilver, lagras luftdeponerat i övre jordmånsprofilen och tillförs morängrundvattnet då grundvattennivåerna är så höga att grundvattnet kommer i kontakt med de metallupplagrade skikten. Lägre medelnivåer, men också lägre maximala grundvattennivåer ger betydliga förändringar i kvicksilverhalterna . I det nu bearbetade materialet har vi bara kvicksilveranalyser i tillräcklig omfattning för att presentera förändringar i tre områden. Som mest beräknas det långsiktiga årsmedelvärdet att minska med drygt 50 procent. Nickel minskar också genomgående, som mest med drygt åtta procent. Observera att skalorna på kilarna är anpassade för varje karta, för att informationen från en del stationer ska kunna synas.



Figur 22. Procentuella förändringar i koncentrationerna för kobolt (t.v.) och koppar (t.h.) från 30-årsperioderna 1991–2000 till 30-årsperioden 2071–2100. Kobolt, liksom koppar, lagras i övre jordmånsprofilen och tillförs morängrundvattnet då nivåerna är så höga att det kommer i kontakt med de metallupplagrade skikten. Lägre medelnivåer, men också lägre maximala grundvattennivåer ger betydligt lägre halter än vid extremt höga grundvattennivåer. Den maximala förändringen för kobolt är 13,5 procent och för koppar nästan nio procent. Även en måttlig ökning av grundvattennivåerna ger lägre kobolt- och kopparhalter. Observera att skalorna på kilarna är anpassade för varje karta, för att informationen från en del stationer ska kunna synas.

SLUTSATSER

Klimatets påverkan på koncentrationer på kemiska ämnen i grundvatten kan uppskattas för grundvatten i morän på grund av moränens fysikaliska egenskaper i kombination med jordmånsprofilens utveckling och egenskaper. Det förelåg signifikanta samband mellan koncentration och grundvattennivå för i stort sett alla kemiska ämnen, men styrkan var svag. De enda testade relationerna som inte uppvisade några signifikanta samband var totalt organiskt kol (TOC), arsenik och kadmium.

Typerna av samband kan relateras till antingen 1) utspädning vid stigande grundvattennivåer av ämnen som är resultatet av vittring eller 2) utspädning vid stigande nivåer, som vid fortsatt stigande nivåer övergår till ökande halter då nivåerna blivit sådana att grundvattnet flödar genom de översta markhorisonterna. Grundvattnet har då möjlighet att mobilisera tungmetaller som bundits till framför allt organiskt material i humus- och översta rostjordsskikten.

Klimatscenarier avseende årstidsvariationerna i grundvattennivåer visar små men tydliga förändringar. Detsamma gäller de flesta kemiska parametrarna. De parametrar som ger de tydligaste förändringarna är alkalinitet och sådana metaller som bundits i de översta lagren i jordmånsprofilerna, som t.ex. kvicksilver (Aastrup m.fl. 1991), bly och koppar. Halterna av bl.a. dessa metaller ökar vid högre grundvattennivåer och minskar vid sjunkande nivåer enligt orsak angiven ovan. Denna studie visar kraftigt minskande kvicksilverhalter i de tre områden där haltförändringar beräknats. De olika kemiska ämnenas, pHs och elektriska konduktivitetens känslighet för förändringar i grundvattennivåer kan illustreras genom redovisningen av inom vilket procenttal den maximala beräknade förändringen ligger:

- mindre än 1 procent: pH och klorid,
- mindre än 5 procent: sulfat, nitrat, ammonium, natrium, kalium, kalcium, magnesium, aluminium och krom,
- mindre än 10 procent: elektrisk konduktivitet, mangan, koppar, nickel och bly,
- mindre än 20 procent: kobolt,
- mindre än 50 procent: alkalinitet,
- mindre än 55 procent: totalt kvicksilver.

I syftet med denna studie ingick att försöka se hur pass representativa resultaten var av de beräkningar, som tidigare utförts på data från IM- (Integrerad Monitoring) området Kindla (Aastrup 2011). I och med att den här studien har ett annat angreppssätt grundat på modellprognosticerade grundvattennivåer och normaliserade kemiska data från ett större antal områden utspridda över landet, så är det intressant att jämföra. Beräkningarna i Kindla grundade sig på en förändring av effektiv nederbörd på ± 50 mm, och relationerna mellan grundvattennivå och grundvattenkemi från ett område. Den teoretiskt beräknade förändringen i nitrathalter i Kindla till perioden 2071–2100 var ± 5 procent, vilket är något större än vad resultaten i denna studie kommit fram till. Förändringarna hos de 14 stationerna varierar från –1,5 procent till +3,0 procent. Båda undersökningarna visar svagt ökande halter vid sjunkande grundvattennivåer. Resultaten ligger glädjande nog i samma härad.

När det gäller grundvatten i sand och grusavlagringarna är det endast ett fåtal parametrar som har signifikanta samband mellan koncentrationer och grundvattennivåer (tabell 5 och figur 10). Den betydligt mäktigare omättade zonen, långt under jordmånen, medför att samband enligt typ 2 (se ovan) inte existerar för tungmetaller i denna grundvattenmiljö. Dessutom innebär den varierande mäktigheten i den omättade zonen att vatten av olika uppehållstid blandas och kemiska skillnader utsläcks. Det ansågs därför inte fruktbart att gå vidare med beräkningar av klimatbetingade förändringar i ämneskoncentrationer i de stora sand- och grusförekomsterna.

LITTERATUR

Aastrup M., Johnson J., Bringmark E., Bringmark L. & Iverfeldt Å., 1991: Occurrence and transport of mercury within a small catchment area. *Water, Air and Soil Pollution 56*. 155–167.

Aastrup M., 2011: Grundvattentransport av näringsämnen – klimatscenarier i Löfgren S. (Ed.) 2011. *Integrerad övervakning av tillståndet i svensk skogsmark – IM Årsrapport 2009.* Institutionen för vatten och miljö, SLU, Rapport 2011:20. English Summary.

Bergström, S., 1976: Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping.

Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M. & Bergström S., 1997: Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, *Journal of Hydrology, Vol. 201*, 272–288.

Ojala L., Thunholm B., Maxe L., Persson G. & Bergmark M., 2007: Kan grundvattenmålet klaras vid ändrade klimatförhållanden? – underlag för analys. *SGU-rapport 2007:9*.

Rodhe A., Lindström G. & Dahné J., 2009: Grundvattennivåer i ett förändrat klimat. Slutrapport SGU FoU-projekt.

Sundén G., Maxe L. & Dahné J., 2010: Grundvattennivåer och vattenförsörjning vid ett förändrat klimat. *SGU-rapport 2010:12*.