

Grundvattennivåer i ett förändrat klimat

Allan Rodhe¹, Göran Lindström², och Joel Dahnée²

¹⁾ Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala

²⁾ Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, Norrköping

Slutrapport från SGU-projektet "Grundvattenbildning i ett förändrat klimat"
proj nr 60-1642/2007

Förord

Detta ettåriga projekt (här kallat projekt 3) hänger intimt samman med två andra ettåriga SGU-finansierade projekt. Projektet bygger på projektet ”Grundvattenbildning i svenska typjordar” (projekt 1), avrapporterat i juni 2006 och projektet ”Grundvattenbildning i svenska typjordar - vidareutveckling av en vattenbalansmodell” (projekt 2), avrapporterat i juni 2008.

I projekt 1 ”Grundvattenbildning i svenska typjordar” utvecklades en modell för beräkning av grundvattenbildning i olika jordartsklasser på olika platser i Sverige.

I projekt 2 ”Grundvattenbildning i svenska typjordar - metodutveckling av en vattenbalansmodell” utvecklades en modell för beräkning av grundvattennivå ur den i projekt 1 beräknade grundvattenbildningen. Huvudsyftet var att validera och vidareutveckla grundvattenbildningsmodellen med hjälp av observerade grundvattennivåer.

I detta projekt, projekt 3 ”Grundvattennivåer i ett förändrat klimat” användes de två modeller som tagits fram i projekt 1 och 2 för att beräkna hur grundvattennivån kan komma att förändras i olika jordar på olika platser i Sverige vid en tänkbar klimatförändring.

Uppsala och Norrköping den 22 oktober 2009

Allan Rodhe, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Göran Lindström och Joel Dahné, SMHI

Innehåll

1. Inledning.....	5
2. Bakgrund	6
Grundvattenbildning i jordakviferer	6
Grundvattennivåer i öppna jordakviferer.....	6
Framtida klimat	7
3. Material och metoder.....	8
Modell för beräkning av grundvattenbildning.....	8
Modell för beräkning av grundvattennivå.....	9
Använda data.....	11
Nederbörd och lufttemperatur.....	11
Grundvattennivåer	11
Kalibreringsstrategier för grundvattennivåmodellen	12
Undersökning av grundvattenbildningsmodellens giltighet under nya klimatförhållanden.....	13
Uppskattning av framtida grundvattennivåer	13
4. Kalibreringsresultat	14
Parameteroptimering.....	14
Grundvattenbildning.....	16
Parametervärden för simulering av framtida grundvattennivåer	18
Belysning av modellens giltighet i ett förändrat klimat	22
5. Resultat av simuleringar för ett förändrat klimat.....	24
Grundvattenbildning.....	24
Förändring av grundvattenytans medeldjup	26
Grundvattennivåns årstidsvariation	26
Känslighet för förändring i temperatur och nederbörd	29
6. Diskussion.....	30
7. Slutsatser.....	31
Referenser.....	32
Appendix	33

Grundvattennivåer i ett förändrat klimat

Allan Rodhe, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Göran Lindström och Joel Dahné, SMHI

1. Inledning

En viktig effekt av ett ändrat klimat är förändrad grundvattenbildning och därmed förändrad grundvattentillgång. Minskad grundvattenbildning kan medföra problem i vissa delar av Sverige, speciellt i östra Svealand och mellersta och östra Götaland, där det idag på många platser finns problem med grundvattenförsörjningen. Utöver den direkta effekten på möjligheten till grundvattenuttag leder minskad grundvattenbildning till sänkta grundvattennivåer, vilket bl.a. kan orsaka försämrad markstabilitet och i kustnära områden öka risken för saltvatteninträngning. Om grundvattenbildningen å andra sidan ökar förbättras naturligtvis uttagsmöjligheterna, men höjda grundvattennivåer kan skapa problem genom bl.a. ökad skredrisk, försumpning, ökat läckage av kol och näringsämnen och försämrad vattenkvalitet på grund av vattnets kortare uppehållstid i den omättade zonen.

Kunskap om dagens grundvattenbildning är en viktig faktor i arbetet att uppnå det av Riksdagen antagna miljömålet "Grundvatten av god kvalitet" med delmålet "Senast år 2010 skall användningen av mark och vatten inte medföra sådana ändringar av grundvattennivåer som ger negativa konsekvenser för vattenförsörjningen, markstabiliteten eller djur- och växtliv i angränsande ekosystem". I Klimat- och sårbarhetsutredningens ansvarsområde ingår att analysera våra vattenresurser i ett klimatperspektiv, en analys som bl.a. måste bygga på information om tänkbara framtida förändringar av grundvattenbildning och grundvattennivåer.

Syftet med denna studie var att belysa hur grundvattenbildning och grundvattennivåer i olika typer av grundvattenmagasin på skilda platser i Sverige kan komma att förändras som följd av en tänkbar klimatförändring. Specifika mål var att

1. Kalibrera en modell för grundvattennivåer mot tidsserier av observerade grundvattennivåer
2. Undersöka om det går att ta fram generella modellparametrar för olika jordarter och andra hydrogeologiska faktorer att användas för översiktlig modellering av grundvattennivåer över landet
3. Ta fram översiktliga kartor över grundvattenbildningens storlek i ett tänkbart framtida klimat
4. Beräkna tänkbara framtida tidsserier av grundvattennivåer vid ett antal grundvattenstationer i olika typer av grundvattenmagasin på skilda platser i landet

2. Bakgrund

Grundvattenbildning i jordakviferer

Nybildning av grundvatten till öppna jordakviferer sker, under svenska förhållanden, främst genom perkolation från ovanliggande omättad zon. När växternas rotzon har tillräckligt hög vattenhalt, vid regn eller snösmältning, kan inte de kapillära krafter som utvecklas i jordens porer hålla allt vatten mot gravitationens inverkan och ytterligare infiltration i jorden medför att vatten perkolerar ned mot grundvattenzonen. Grundvatten kan också tillföras akviferen lateralt, genom grundvattenflöde från anslutande akviferer, vars grundvatten bildats av nederbörd på motsvarande sätt. I denna rapport behandlas dock endast vertikal grundvattenbildning orsakad av perkolerande regn- eller smältvatten.

Grundvattennivåer i öppna jordakviferer

Grundvattenytans medelnivå på en viss plats i en öppen akvifer beror på grundvattnets vattenbalans på platsen. Grundvattenytan ställer in sig på den nivå som krävs för att det grundvatten som bildats uppströms ska kunna ledas vidare nedströms. Ju lägre den hydrauliska konduktiviteten är, desto mäktigare grundvattenzon och desto större lutning hos grundvattenytan krävs för att leda bort ett visst vattenflöde. Grundvattenytan ligger därför generellt sett ytligare och lutar mer i en finkornig jord än i en grovkornig. Utöver denna generella faktor bestäms nivån av de lokala hydrogeologiska förhållandena. Dämning nedströms av geologiska trösklar eller vattenytor kan t.ex. medföra ytligt grundvatten även i grova jordar med stor mäktighet. Dämning av vattenytor och det faktum att mer grundvatten ska ledas fram allteftersom avståndet till grundvattendelaren ökar gör att grundvattenytan blir allt ytligare ju närmare vattendraget man kommer.

När mer grundvatten tillförs en punkt än vad som kan ledas undan stiger grundvattennivån. Grundvattenzonens mäktighet ökar, grundvattenytans lutning ökar ofta något och, speciellt i moränjord, ytligare lager med förhållandevis hög konduktivitet börjar bidra till flödet. Alla dessa faktorer bidrar till att flödet i punkten ökar. Ökningen pågår till dess att utflödet ur en betraktad enhetsyta är lika med inflödet. Om ingen ytterligare grundvattenbildning sker uppströms kommer utflödet att avklinga allteftersom grundvattenmagasinet uppströms töms och därmed grundvattennivån sänks.

Grundvattennivån ändring, Δh , vid en viss ändring, ΔS , av grundvattenmagasinets innehåll beskrivs ges av

$$\Delta h = \frac{\Delta S}{e_p}$$

där e_p är magasinskoefficienten, vilken för en öppen akvifer är lika med den effektiva porositeten¹. Den effektiva porositeten är omkring 5% i moränjord och 10-20% i sand- och grusjordar. Den mindre effektiva porositeten gör att nivåvariationerna under året blir störst i en moränjord.

¹ Detta är den traditionella svenska definitionen av effektiv porositet. I nyare engelskspråkig litteratur betecknar "effective porosity" ofta den porositet som medverkar i grundvattnets strömning, dvs kvoten mellan grundvattenföring per tvärsnittsarea och grundvattnets transporthastighet. Begreppen har helt olika innebörd.

Grundvattennivåns sänkning under perioder utan grundvattenbildning kan på många platser approximativt beskrivas som en exponentiell avklingning, dvs grundvattenmagasinet antas fungera som ett linjärt magasin (ett magasin vars utflöde är proportionellt mot magasininnehållet). Grundvattennivån, $h(t)$, vid tiden t kan då skrivas

$$h(t) - h_{ref} = (h_o - h_{ref})e^{-kt}$$

där h_{ref} är den referensnivå mot vilken grundvattennivån enligt approximationen avklingar, dvs den nivå vid vilken grundvattenutflödet upphör. h_o är grundvattennivån vid tiden $t = 0$ och k är recessionskoefficienten (s^{-1}). I verkligheten upphör grundvattenflödet bara när grundvattenmagasinet är tomt, vilket kan ske t.ex. i ett magasin på en tät berggrund, eller när grundvattennivån når ned till en dämmande tröskel ovanför vilken grundvattenytan då blir horisontell.

En förutsättning för att denna approximation ska gälla är att grundvattenflödet sker i huvudsak lateralt. Om grundvattennivåns sänkning i stället beror på rent vertikalt utflöde sjunker grundvattennivån linjärt med tiden

$$h(t) = h_o - \alpha t$$

där α är en utflödeskoefficient som anger avsänkingshastigheten (ms^{-1}).

I en mäktig omättad zon utjämnas och fördröjs perkulationspulserna på sin väg mot själva grundvattenbildandet. Det gör att grundvattenytans nivåvariationer blir mindre än vid ytligt grundvatten och variationerna blir fördröjda jämfört med perkulationspulsens start vid markytan. I den här studiens modell för grundvattennivåer beräknas denna dämpning och fördröjning genom att perkulationspulserna matematiskt får passera ett linjärt magasin innan de når grundvattenzonen.

Framtida klimat

Det går inte att förutsäga det framtida klimatet. En allmän mening bland klimatforskare är dock att de globala cirkulationsmodeller som används ger en uppfattning om möjliga utfall vid olika grader av växthusgastillförsel (IPCC, 2007). För att bedöma framtida grundvattenbildning och grundvattennivå på en viss plats, och t.ex. regionala skillnader inom Sverige, krävs emellertid klimatscenarier med betydligt bättre upplösning i rummet än vad de globala modellerna ger. Frågan om hur man kan få fram tänkbara tidsserier av det framtida klimatet på en viss plats ur resultaten av de globala cirkulationsmodellerna är ett mycket aktivt forskningsfält (se t.ex. Hay m.fl. 2000, Wetterhall m.fl. 2006). Denna s.k. nedskalning görs antingen genom att man upprättar regionala cirkulationsmodeller, med indata från de globala cirkulationsmodellerna, eller genom statistisk nedskalning med hjälp av empiriska samband mellan klimatvariabler i den globala cirkulationsmodellens skala och observerade data, t.ex. mellan tryckfält och nederbörd.

Scenarier från regionala klimatmodeller kan inte användas direkt för att beräkna förväntade förändringar i det hydrologiska systemet, t.ex. genom hydrologisk modellering, bl.a. på grund av att klimatmodellerna inte lyckas efterlikna dagens klimat. En metod är den s.k. deltamodellen (se t.ex. Andréasson m.fl. 2004), där man skapar ett framtida scenario genom att till dagens observerade data lägga den skillnad som klimatmodellen ger mellan simuleringar av klimatet i framtiden och idag. För nederbörd har man använt en procentuell förändring och för lufttemperatur har man adderat en korrektionsfaktor som varierar med årstiden. En annan metod är den s.k. skalningsmetoden (Rosberg m.fl. 2006, Yang et al., 2008) där man använder klimatmodellens resultat, med vissa justeringar grundade på jämförelser mellan observerat och simulerat klimat idag. Med denna metod utnyttjar man de statistiska egenskaper som framtidens klimat fått enligt klimatmodellen och även hur dessa egenskaper förändras med tiden.

För att grundvattenbildning ska ske krävs att markvattenhalten har uppnått ett mer eller mindre väldefinierat tröskelvärde. Tidsfördelningen av det regn som ger en viss regnsumma spelar därför stor roll, liksom tidsfördelningen av den potentiella avdunstningen. Så kan t.ex. en sommarmånads grundvattenbildning bli betydligt större av en dags nederbörd än av samma eller större regnmängd som föll i småportioner under månaden, med upptorkning av jorden mellan regnen. De tidsserier av klimatscenarier som används vid beräkning av grundvattenbildning måste därför i så stor utsträckning som möjligt ha sannolika statistiska egenskaper, t.ex. vad gäller extremvärden, frekvensfördelning och torrperioders längd liksom samvariationen mellan nederbörd och potentiell avdunstning (i denna studie beräknad ur lufttemperaturen). Användning av statistiska s.k. vädergeneratorer är en metod att ta fram sådana lokala klimatscenarier ur de globala klimatmodellernas resultat (Liao m.fl. 2004).

I denna studie användes en transient simulering av klimatet 1961-2100, baserad på en regional nedskalning med RCA-modellen av hur den globala Echam-modellen tolkat utsläppsscenario A1b (Yang et al., 2008, Yang et al., accepted). I den hydrologiska tolkningen har den ovan beskrivna skalningsmetoden använts.

3. Material och metoder

En enkel modell för beräkning av grundvattennivåer kalibrerades mot tidsserier av observerade grundvattennivåer i olika jordar på olika platser i Sverige. Indata till modellen var grundvattenbildning beräknad ur nederbörd och lufttemperatur enligt Rodhe m.fl. (2006). Modellparametrar från dessa kalibreringar användes därefter för att uppskatta grundvattennivåer i ett tänkbart framtida klimat. Detta gjordes dels för ett urval enskilda grundvattenstationer, dels yttäckande över landet med hjälp av generella parameteruppsättningar för olika jordar.

Modell för beräkning av grundvattenbildning

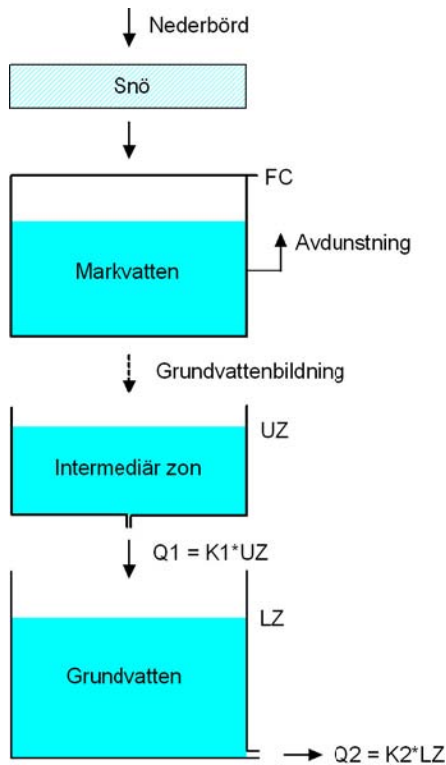
Grundvattenbildningen är naturligtvis en nyckelfaktor när det gäller att bedöma hur grundvattennivåerna kan tänkas förändras vid en klimatförändring. Det är ju förändringar i grundvattenbildningens storlek som kan ge en tänkbar förändring av grundvattennivåerna. Här ges en översiktlig beskrivning av modellen för beräkning av grundvattenbildning i olika jordar och hur den kalibrerats. Metoden och de data som användes för dessa beräkningar beskrivs detaljerat i Rodhe m.fl. (2006).

Grundvattenbildningen beräknas med hjälp av vattenbalansberäkningar för rotzonen. Vid dessa beräkningar används, i något förenklade former, mark- och snömodulerna i HBV- modellen (Bergström, 1976, Lindström m.fl., 1997). Liksom i HBV- modellen betraktas rotzonen som en tvättsvamp till vilken allt regn eller smältvatten infiltrerar. Utflödet ur rotzonen sker genom avdunstning och perkolation. Avdunstningen är lika med den potentiella avdunstningen, reducerad med en faktor som beror av jordens vatteninnehåll. Grundvattenbildning (perkolation) antas i den här förenklade modellen, till skillnad från i HBV- modellen, ske endast då det beräknade vatteninnehållet överskrider ett visst värde, parametern fältkapacitet (F_c). När detta värde uppnåtts perkolerar allt ytterligare tillfört vatten. Perkolationen sker således i analogi med flödet ur en kran som, beroende på rotzonens vatteninnehåll, antingen är helt stängd eller helt öppen. Det som i modellen skiljer olika jordarter åt vad gäller grundvattenbildning är deras vattenhållande egenskaper, beskrivet av parametern F_c (fältkapacitet = rotzonens lagringskapacitet).

I Rodhe m.fl. (2006) optimerades värden på parametern F_c för tre olika markklasser: *grov jord*, *morän* och *fin jord*. Optimeringen gjordes genom att beräknad grundvattenbildning kalibrerades mot observerad specifik avrinning i 161 avrinningsområden ($< 2000 \text{ km}^2$) i Sverige med utnyttjande av jordartsfördelningen inom avrinningsområdena. De framtagna parametervärdena användes sedan för att beräkna 40 års tidsserier av grundvattenbildningen över hela landet i de tre markklasserna, redovisat i kartform i Rodhe m.fl. (2006). Data från dessa beräkningar användes som indata för den grundvattennivåmodell som beskrivs nedan.

Modell för beräkning av grundvattennivå

Grundvattennivån beräknas enligt en mycket förenklad variant av HBV- modellen Figur 1. Den beräknade grundvattenbildning perkolerar från rotzonen till två seriekopplade magasin. Det övre magasinet, tänkt att representera en stor intermediär markvattenzon, ger en fördröjning och dämpning av perkolationspulsen. Det nedre magasinet representerar grundvattenmagasinet. Förändringen i grundvattennivå beräknas som magasinensändring dividerad med effektiv porositet (magasinskoefficient). Beräkningarna görs med tidssteget ett dygn och magasinensinnehåll uttrycks i mm (Lm^{-2}).



Figur 1 Modell för beräkning av grundvattennivån.

För beräkning av grundvattennivå ur den beräknade grundvattenbildningen krävs tre parametrar, vilka ställs in genom anpassning till observerade grundvattennivåer.

recessionskoefficienten K_1 (övre magasin) $0 < K_1 \leq 1$ (dygn^{-1})

recessionskoefficienten K_2 (undre magasin) $0 < K_2 < 1$ (dygn^{-1})

effektiv porositet e_p (= magasinskoefficient) $0 < e_p < 1$ (-)

När den omättade zonen är tunn kan det övre magasinet kopplas bort genom att man sätter $K_1=1$. Magasinet töms då helt under samma tidssteg som det fylls, och dess dämpande och fördröjande effekt försvinner.

Utöver dessa parametrar behövs för varje rör en referensnivå, D_{ref} (här angiven i m under markytan), som anger den nivå mot vilken grundvattennivå avklingar vid en lång period utan grundvattenbildning. Detta motsvarar den grundvattennivå vid vilken modellens nedre magasin är tomt ($L_Z=0$).

Formuleringen av utflödena Q_1 och Q_2 ur magasinen (så kallade linjära magasin) innebär att magasininnehållen avklingar exponentiellt när ingen tillförsel sker och att således grundvattennivå avklingar exponentiellt mot den referensnivå som nämndes ovan. Vid vissa kalibreringsförsök utökades grundvattenutflödet Q_2 med ett konstant utflöde K_3 ,

$$Q_2 = K_2 L_Z + K_3$$

vilket konceptuellt motsvarar att det sker ett vertikalt grundvattenflöde mot underliggande jordlager eller berggrund. Detta gav en fjärde parameter att kalibrera, en konstant utflödeskoefficient K_3 (undre magasin), $K_3 > 0$ (mm dygn⁻¹).

Använda data

Nederbörd och lufttemperatur

Modellen för grundvattenbildning drivs av nederbörd och lufttemperatur. För validering av grundvattenbildningsmodellen, och kalibrering av grundvattennivåmodellen mot observerade grundvattennivåer, användes dygnsvärden av nederbörd och lufttemperatur från SMHI:s klimatdatabas för tillämpning av hydrologiska modeller. Denna databas, kallad PTHBV, innehåller värden från och med 1961 och uppdateras kontinuerligt. Värdena har interpolerats fram för ett rutnät med upplösningen 4x4 km för hela Sverige. Metodiken bygger på geostatistisk interpolation och har utvecklats av Johansson (2002). Grundinformationen med upplösningen 4x4 km tar hänsyn till topografi, vindförhållanden och korrekationer för mätfel vid mätning av nederbörd. Ur detta rutnät togs data fram för enskilda grundvattenstationer. För yttäckande beräkningar användes SMHI:s ordinarie system (HBV-IN) för att vikta data från rutnätet till delavrinningsområden. Detta gjordes för beräkning av grundvattenbildningen över landet genom modellberäkningar i 1001 avrinningsområden (förutom de av dessa som innefattar fjällområden).

Grundvattennivåer

Tidsserier av grundvattennivåer från SGU:s grundvattennät användes vid kalibreringarna. Detta när omfattar ca 330 stationer (observationsrör) med pågående mätningar, fördelade inom ca 80 områden över landet. Merparten av stationerna påbörjades under perioden 1965 – 1975. Mätningarna har gjorts manuellt med ca två veckors mellanrum. För varje station finns angivet bland annat jordart och om det är en öppen eller sluten akvifer.

Tidsserier valdes ute enligt följande kriterier:

- Endast pågående mätserier (att en mätserie avbrutits beror ofta att det varit problem med mätdata)
- Långa serier för att ge tillräcklig längd för kalibrering och validering
- Endast öppna akviferer
- Stationer i utströmningsområden (enligt Grundvattennätets databeskrivning) utgår (4 st)
- Områden i fjälltrakter utgår eftersom de inte ingått i kalibreringen av grundvattenbildningsmodellen på grund av osäkerhet i nederbördsdata
- God datakvalitet – detta bedömdes manuellt för varje observationsrör

Detta gav vid en första genomgång 220 stationer fördelade på 48 områden som kunde användas för kalibrering och validering. Vid närmare granskning visade det sig att 18 av dessa rör var olämpliga på grund av misstänkta datafel eller på grund av att nivåvariationen tydde på att stationen ligger i ett utströmningsområde. Det senare visade sig genom att grundvattennivån tidvis nådde upp till markytan eller tycktes nå upp till ett högkonduktivt lager nära markytan som

effektivt kan leda undan vatten lateralt, vilket förhindrade ytterligare höjning av nivån. Grundvattenmagasinet ser ut att ha ”bräddats”.

De jordarter som angivits för stationerna slogs samman till de tre markklasser för vilka grundvattenbildningsmodellens parameter F_c tidigare optimerats: *grov jord* (grus, sand), *fin jord* (lera, finmo, moränlera) och *morän*. Av de kvarvarande 203 rören var 101 i grov jord, 101 i morän och 1 i fin jord.

Grundvattennätets data organiserades så att de kunde användas tillsammans med grundvattenbildningsmodellen. Grundvattenbildningen för en viss koordinat under viss tidsperiod beräknades för vald markklass, där markklassen representerades av ett visst värde på parametern F_c .

Kalibreringsstrategier för grundvattennivåmodellen

Olika tillvägagångssätt för kalibrering av modellens parametrar testades. Som anpassningsmått användes R^2 -värdet enligt Nash och Sutcliffe. Kalibreringen gjordes dels manuellt, dels med en automatisk optimeringsrutin.

Omfattade försök gjordes med montecarlokalibreringar, där ett stort antal simuleringar av tidsserier gjordes för alla rör med uppsättningar av parametervärden som slumpats fram. För att få en lämplig spridning på parametern K_2 beräknades denna parameter utifrån slumpade värden på det logariterade värdet av K_2 . För att begränsa antalet modellkörningar avgränsades parametrarnas värden inom intervall som bedöms som rimliga. Medelvärden av de parametervärden som gav de 100 bästa R^2 -värdena användes för den slutgiltiga simuleringen med automatiskt framtagna parametervärden.

Vid stationsspecifik kalibrering togs en individuell optimal parameteruppsättning fram för varje station. Försök gjordes även med jordartsspecifik kalibrering, där en gemensam optimal parameteruppsättning togs fram för varje jordart.

Vid modellkalibreringen gäller det att få modellen att efterlikna grundvattennivåns tidsvariationer. Så länge den observerade grundvattennivån inte når markytan saknar grundvattenytans djup under markytan intresse för kalibreringen, det är tidsvariationerna och inte på vilken nivå dessa sker som ska efterliknas. Parametern D_{ref} (referensnivån) är därför speciell till sin karaktär jämfört med de övriga parametrarna. Den behövs om man ska optimera den beräknade grundvattennivån direkt mot den observerade, vilket ger 4 parametrar att optimera i modellens grundversion (dvs utan konstant utflöde ur det undre magasinet). Vi hanterade referensnivån på tre sätt vid kalibreringen

1. Referensnivån antogs ligga på ett visst avstånd, d (m), under den lägsta observerade grundvattennivån, dvs $D_{ref} = d_{max} + d$. Sträckan d gavs antingen ett konstant värde, t.ex. 0,2 m, eller optimerades fram.
2. Referensnivån eliminerades genom att kalibrering gjordes mot grundvattennivåns förändring mellan två på varandra följande nivåobservationer. Modellens nivåförändring under

motsvarande tidsperiod jämfördes med den observerade förändringen, beräknad som differensen mellan nivån vid mättillfället och vid föregående mättillfälle. Optimering av de tre parametrarna K_1 , K_2 och e_p gjordes med hjälp av R^2 -värdet beräknat för skillnaden mellan dessa differenser. Den så optimerade tidsserien parallellförskjöts sedan så att den överensstämde så bra som möjligt med den observerade seriens nivå. Detta gjordes genom automatisk optimering av parametern D_{ref} med R^2 -värdet beräknat ur nivåskillnaderna.

3. Referensnivån eliminerades genom att avvikelserna från den observerade respektive beräknade tidsseriens medelvärde jämfördes. Optimering av de tre parametrarna gjordes med hjälp av R^2 -värdet beräknat för dessa avvikelser. På samma sätt som i metod 2 parallellförskjöts den simulerade tidsserien för jämförelse med den observerade serien.

Undersökning av grundvattenbildningsmodellens giltighet under nya klimathållanden

Ett grundläggande problem när en hydrologisk modell med kalibrerade parametrar används under förändrade klimathållanden är i vilken grad modellen är giltig utanför det klimat för vilken den är kalibrerad (se t.ex. Wilby, 2005). För att belysa denna fråga analyserades resultaten från grundvattenbildningsmodellens kalibrering, vilken gjordes mellan beräknad grundvattenbildning och observerad årlig avrinning i 161 avrinningsområden under perioden 1962–2003. Vi undersökte om det fanns samband mellan det relativa felet i beräknad årlig avrinning (=antagen grundvattenbildning) och nederbördens och lufttemperaturens avvikelse från respektive flerårsmedelvärde. Detta gjordes för tre stationer i södra Sverige och tre i norra.

Om inga sådana samband råder ökar trovärdigheten i modellens förutsägelser över hur grundvattenförhållandena påverkas av ett förändrat klimat.

Uppskattning av framtida grundvattennivåer

Grundvattennivåns förändring vid en tänkbar klimathändring uppskattades genom att framtida grundvattenbildning beräknades med nederbörds- och temperaturserier baserade på det valda klimatscenarioet. Beräkningarna gjordes för perioden 1961–2100.

Förändringarna i grundvattenbildning och grundvattennivåer beräknades genom att de framtida förhållandena jämfördes med dagens förhållanden, beräknade med samma klimatscenario. Resultaten presenteras dels som grundvattennivåns medelårsvariation för utvalda 30-årsperioder, dels som kartor över differensen mellan beräknad medelgrundvattennivå för perioden 2071–2100 och dagens förhållanden, representerade av perioden 1961–1990. Kartor över motsvarande differens togs även fram för grundvattenbildningen.

De automatiska kalibreringsrutiner som utvecklades för grundvattenmodellen gav inte tillräckligt goda resultat för att de parametervärden som optimerats fram skulle kunna användas för beräkningarna av framtida grundvattennivåer, se vidare kapitel 4. Därför valdes ett antal stationer ut för vilka den automatiska modellanpassningen var acceptabel och för dessa gjordes manuella kalibreringar, vilket förbättrade anpassningen. Bland dessa valdes 5 stationer med god anpassning i var och en av tre markklasserna, ”*grov jord med yllig grundvattenyta*”, ”*grov jord med djup grundvattenyta*”

och ”morän”. Dessa 15 stationer användes för simulering av framtida nivåer i skilda jordar i olika delar av landet.

För att få fram kartorna över uppskattad nivåförändring beräknades grundvattennivåer för generaliserade jordar ur interpolerad temperatur och nederbörd för landet uppdelat i de 1001 avrinningsområdena. Vid dessa beräkningar användes medianvärden av de parametervärden som kalibrerats fram manuellt för var och en av de tre markklasserna.

Effekten av en tänkbar klimatförändring belystes också genom att känsligheten hos de beräknade grundvattennivåerna för givna förändringar i nederbörd och lufttemperatur beräknades. Grundvattennivåns observerade medelårsvariation 1961-1990 jämfördes med beräknad medelårsvariation vid $\pm 10\%$ ändring av dygnsnederbörden respektive $\pm 2,5$ °C ändring av lufttemperaturen.

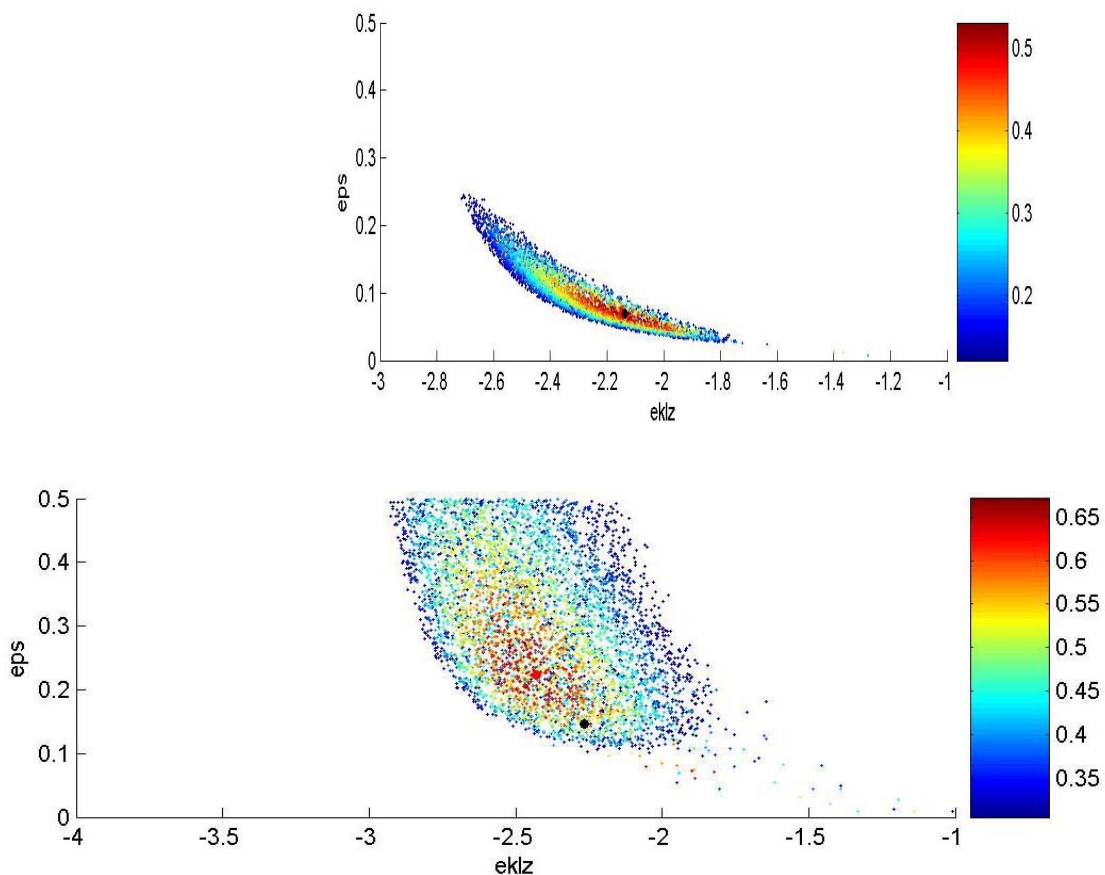
4. Kalibreringsresultat

Inledande manuella kalibreringar av grundvattennivån vid ett urval av stationerna visade att det gick att få god överensstämmelse mellan beräknad och observerad grundvattennivå i såväl *morän* som *grov jord*. De automatiska kalibreringarna, som gjordes för de 203 stationer som kvarstod i databasen efter det att stationer som bedömts som olämpliga tagits bort, gav emellertid inte tillräckligt goda resultat för att användas vid simuleringar för ett förändrat klimat. För dessa simuleringar valde vi därför, som tidigare nämnts, att utnyttja parametervärden som tagits fram vid manuella kalibreringar. Resultaten av de automatiska kalibreringarna diskuteras i Rodhe m.fl. (2008). Nedan presenteras några erfarenheter från dessa kalibreringar.

Parameteroptimering

Nash och Sutcliffes R²-värde var inte ett optimalt kriterium för anpassning av grundvattennivåernas tidsserier. De parameteruppsättningar som gav de högsta R²-värdena hade i många fall en dålig avvägning mellan anpassning till grundvattennivåns toppvärden och dess anpassning till det sena recessionsförloppet.

Optimeringen kompliceras av att parametrarna är beroende av varandra. (Detta problem finns naturligtvis vid såväl manuell som automatisk kalibrering.) Parametern effektiv porositet, e_p , bestämmer hur mycket grundvattennivån ändras vid en viss beräknad magasinensändring. En liten effektiv porositet ger en stor höjning av grundvattennivån för en viss grundvattenbildning och en stor och snabb avsänkning vid en viss utströmning. Vid kalibrering kan därför ett alltför stort värde på e_p kompenseras av ett litet värde på recessionsparametrarna. Två exempel ges i Figur 2 som visar sambandet mellan e_p och det undre magasinets recessionskoefficient, K_2 , för en station med morän och en med sand.



Figur 2. Samband mellan värden på effektiv porositet (eps) och logK2 (eklz) för de 5000 simuleringar som gav högst R2-värden. Station 15008 Herrljunga *morän* (övre diagrammet) och station 3003 Kristianstad *grov jord* (sand) (nedre diagrammet, som är avskapat och inte visar alla 5000 värden). Punkternas färg representerar R2-värdet enligt respektive färgskala. Stor svart punkt = bästa resultat, stor röd punkt = medel av de hundra bästa resultaten.

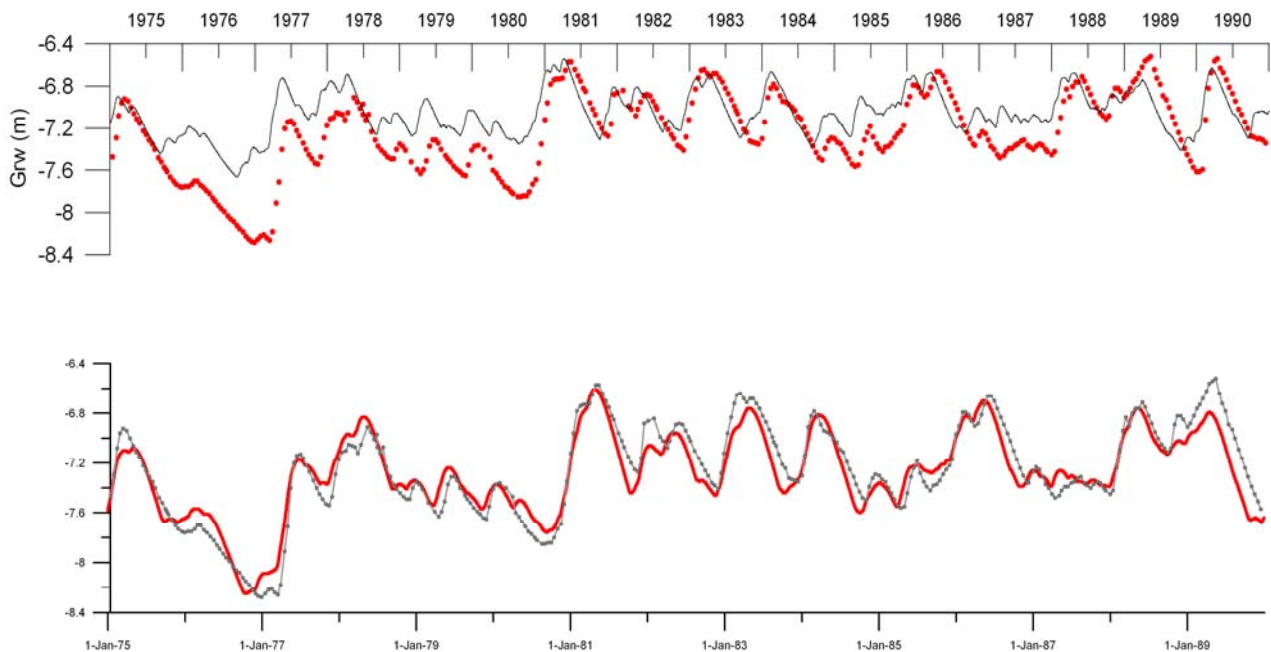
För de flesta stationerna i morän var sambandet förhållandevis entydigt, dvs punktsvärmen var smal (och bananformad) som i figurens exempel. I stationerna med grov jord var sambandet mindre skarpt och punktsvärmen förhållandevis utspridd.

Metoderna att eliminera referensnivån, D_{ref} genom att kalibrera de tre kvarvarande parametrarna mot differensen mellan två på varandra följande nivåvariationer eller mot avvikelser från grundvattennivåns medelvärde gav ingen förbättring jämfört med att behandla D_{ref} som en fjärde parameter att optimera. Det innebär dock en stor tidsvinst att använda 3 i stället för 4 parametrar. Tidsåtgången för en 15 års montecarlokalibrering för 55 stationer med 4 parametrar var 53 timmar. När motsvarande simulering gjordes med 3 parametrar var tidsåtgången 2 timmar.

Försök gjordes, som nämnts, även med en konstant utflödeskomponent ur det nedre magasinet. Kalibrering med enbart konstant utflöde ($K_2=0$ så att $Q_2 = K_3$) provades för utvalda rör med till synes linjär recession, men det gav inte bra resultat. En kombination av linjär och exponentiell komponent hos recessionen ($Q_2 = K_2 L_Z + K_3$) gav för vissa rör en förbättring, men resultaten motiverade inte att ytterligare en parameter infördes.

Parametern K_1 , det övre magasinets recessionskoefficient, reglerar som nämnts dämpningen och fördröjningen i den intermediära zonen. Ju mindre värdet på K_1 är, desto mer dämpas och fördröjs grundvattenbildningspulserna. Som förväntat kom det fram ett negativt samband mellan det framoptimerade värdet på K_1 och markvattenzonens mäktighet, dvs djupet till grundvattenytan (se Rodhe m.fl. 2008). Ett sådant samband skulle möjligen kunna utnyttjas för att uppskatta K_1 ur grundvattenytans medeldjup, men det har inte provats i denna studie.

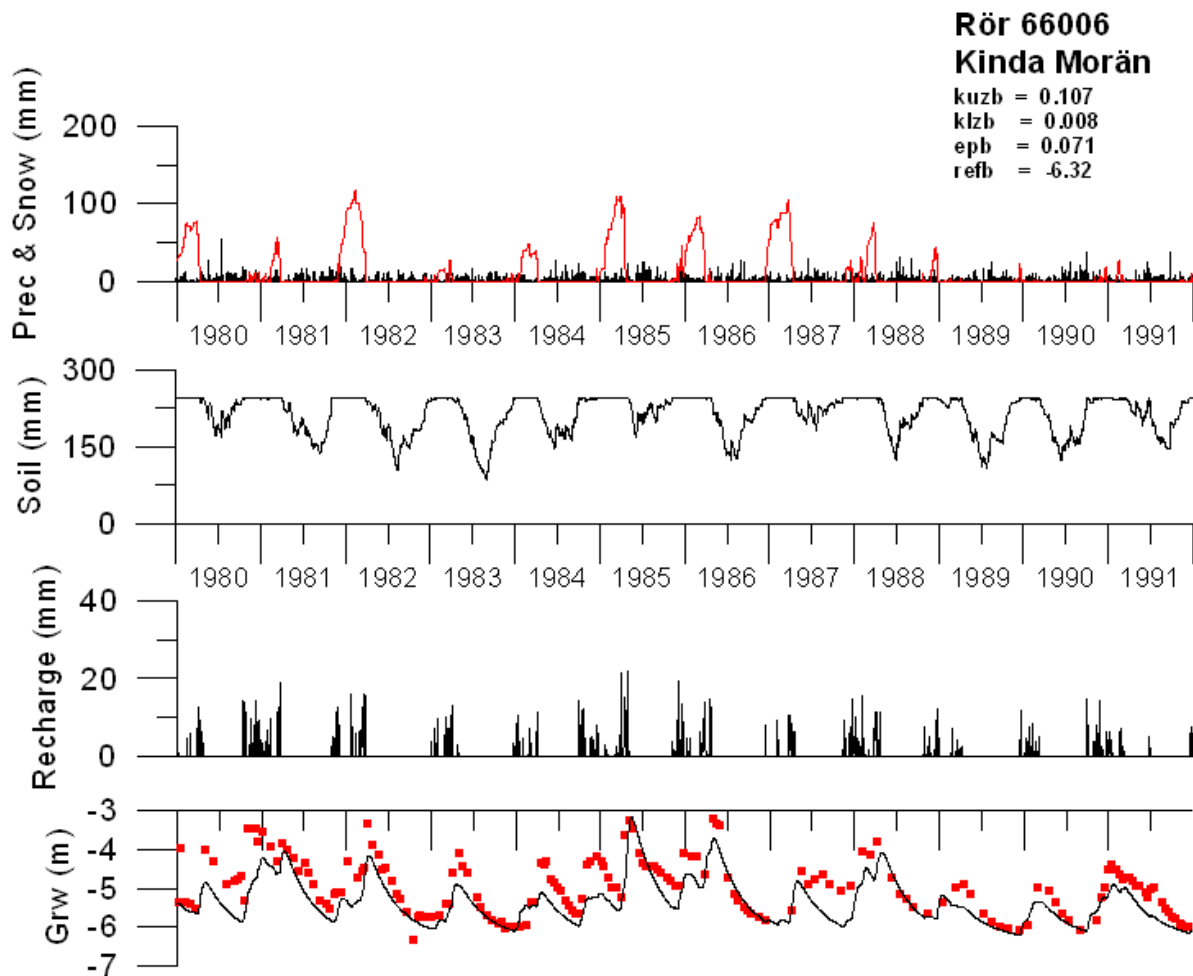
Som ett exempel på hur en manuell kalibrering kunde ge bättre anpassning än den automatiska visas i Figur 3 simuleringar för stationen 14006 Nissafors (sand). Utgående från sådana jämförelser valde vi att använda parametervärden från manuella kalibreringar som underlag för uppskattningar av framtida grundvattennivåer.



Figur 3 Observerade (svart tunn linje med eller utan prickar) och simulerade (röda prickar eller tjock linje) grundvattennivåer i sand (station 14006 Nissafors). Automatisk kalibrering (övre diagrammet) och manuell kalibrering (nedre diagrammet).

Grundvattenbildning

Det som kommenterats ovan gäller parameteroptimering för grundvattennivåmodellen, dvs optimering av parametervärden så att de simulerade grundvattennivåerna stämmer överens med de observerade vid en given grundvattenbildning. Parametervärden i grundvattenbildningsmodellen har hela tiden hållits konstanta, lika med de som togs fram i Rodhe m.fl. (2006). Kalibreringsresultaten kan användas för att validera grundvattenbildningsmodellen. Goda simuleringar av grundvattennivåer stärker tilltron till den beräknade grundvattenbildningen.



Figur 4 Nederbörd (mm dygn⁻¹) och beräknat snömagasin, beräknat markvattenmagasin, beräknad grundvattenbildning (mm dygn⁻¹), observerad (prickar) och beräknad (heldragen linje) grundvattennivå. Kinda 6606 morän. Kalibrerad med metod 2, dvs mot nivåskillnaden mellan på varandra följande observationer.

Även om simuleringarna för station Kinda 6606 (Figur 4), lyckades beskriva grundvattenytans nivåvariationer relativt väl visar ett närmare studium av resultatet brister i den använda grundvattenbildningsmodellen. Enligt modellen sker grundvattenbildning endast när markvattenhalten uppnått fältkapaciteten (= parametern F_c), men detta tycks i vissa fall vara en alltför stor förenkling. Sommaren 1987 var blöt och kall i denna del av landet (Östergötland). Den beräknade markvattenhalten höll sig relativt hög, men regnet fördelade sig på ett sätt i tiden så att markvattenhalten ständigt låg under fältkapaciteten. Därför skedde ingen grundvattenbildning enligt modellen, och grundvattennivåmodellen simulerar recession hela sommaren. Observationerna visade dock att grundvattennivån höll sig i stort sett konstant över sommaren, vilket tyder på att det skedde grundvattenbildning. Även sommaren 1985 skedde sannolikt grundvattenbildning vilket inte sker i modellen.

Försök gjordes att komma tillrätta med denna brist i grundvattenbildningsmodellen genom att tillföra en parameter som låter perkolationen minska gradvis när markvattenhalten sjunker under fältkapacitet (motsvarande HBV-modellens β -parameter (Bergström, 1976). För att bibehålla den

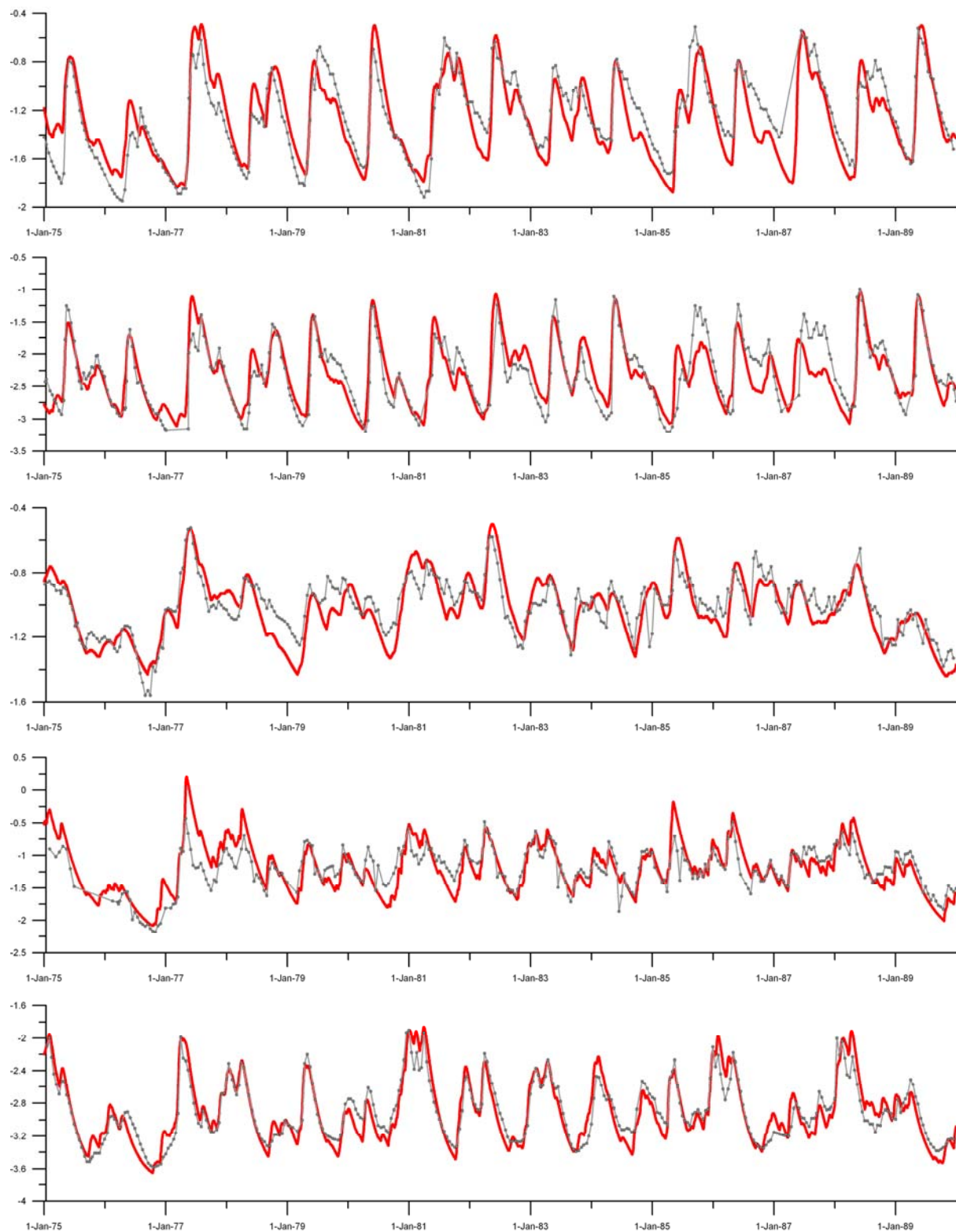
vattenbalans som grundvattenbildningsmodellen bygger på krävde detta omkalibrering av grundvattenbildningsmodellens parametrar, vilka tagits fram genom kalibrering mot observerad avrinning. Införandet av en gradvis perkolation innebär nämligen en omfördelning i tiden av en viss sammanlagd grundvattenbildning. På samma sätt som den ursprungliga grundvattenbildningsmodellen kalibrerades mot observerad avrinning i 161 avrinningsområden kalibrerades den nu för att få fram värden på både F_c och den nya parametern β . Vi lyckades emellertid inte få användbara parametervärden vid dessa försök. En bidragande förklaring kan vara att man, för att undvika effekten av fördröjning av avrinningen på grund av tillfällig lagring i avrinningsområdet, måste kalibrera mot avrinningens årsvärden. Dessa värden innehåller inte tillräcklig information för att ge underlag för en god kalibrering inom åren. Problemet med att grundvattenbildningen kan underskattas under kalla och våta somrar kvarstår därför i den modell som användes för simulering av framtida grundvattennivåer.

Parametervärden för simulering av framtida grundvattennivåer

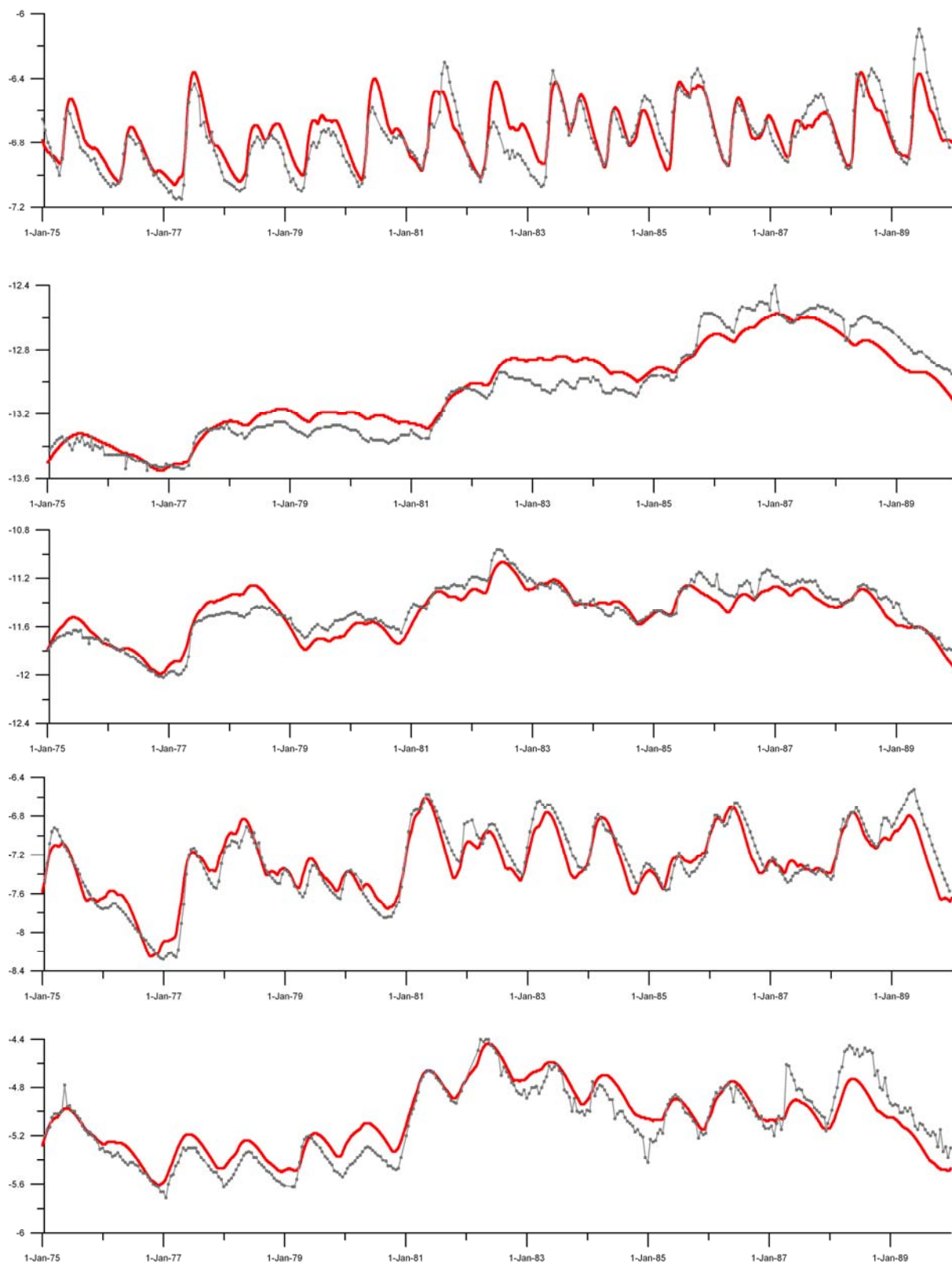
Utgående från resultatet av 42 manuella kalibreringar valdes 25 stationer som underlag för simulering av framtida grundvattennivåer, se exempel i Figur 5 a,b,c. De framtagna parametervärdena användes dels för simulering av framtida grundvattennivåer vid respektive station, dels för att ta fram generella parametervärden (Tabell 1) för de olika markklasserna att användas för yttäckande beräkningar av grundvattennivåns tänkbara förändring i ett framtida klimat.

Tabell 1 Generella parametervärden som använts för ytmässig beräkning av grundvattennivåns förändring i ett förändrat klimat. Medianvärden av manuellt framoptimerade parametervärden.

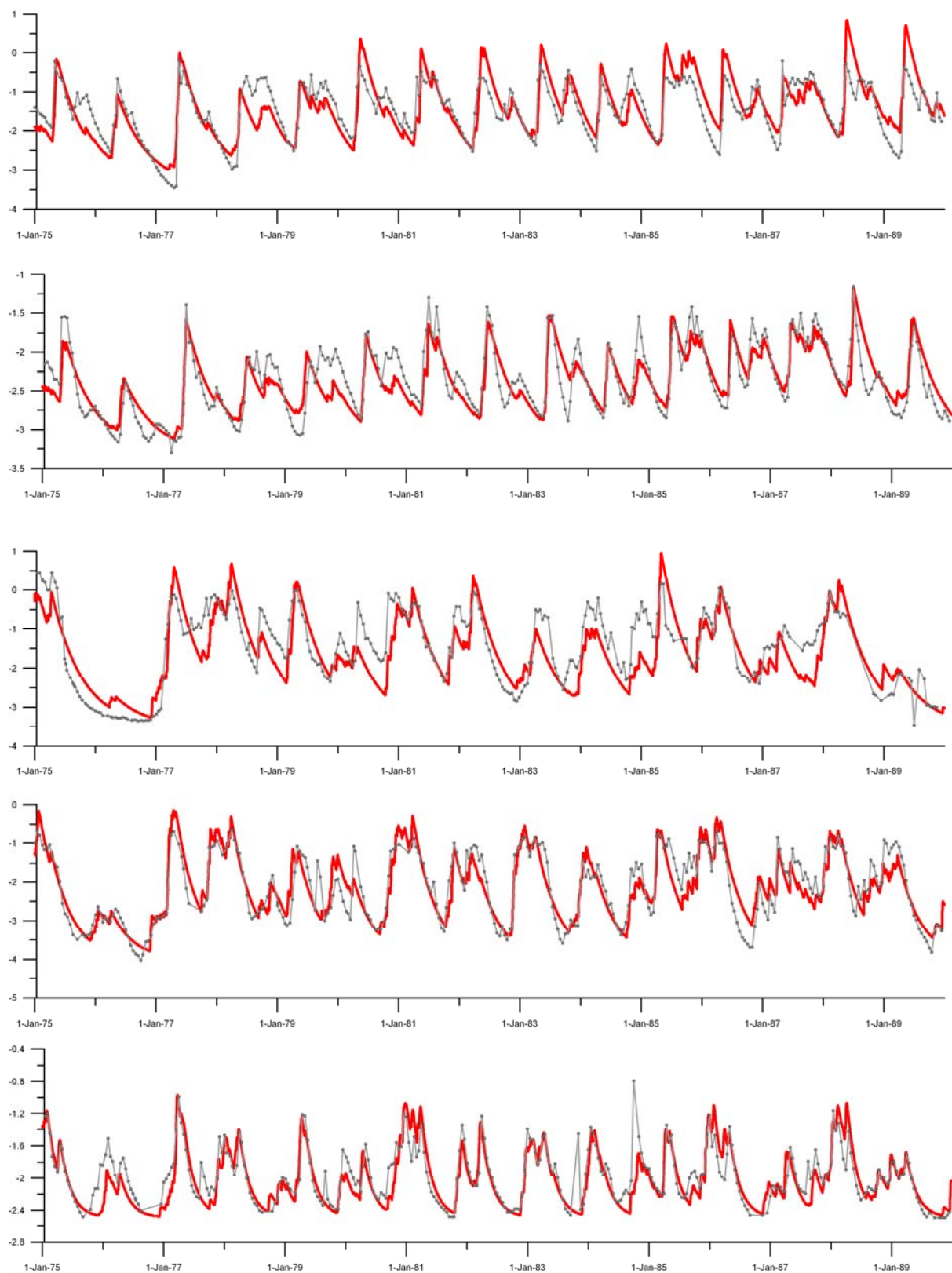
	K1	K2	e_p	D_{ref} m under markytan	R2
Markklass	dygn ⁻¹	dygn ⁻¹			
Grov jord, yttlig (n=5)	0,085	0,0085	0,12	2,4	0,7
Grov jord, djup (n=12)	0,015	0,0036	0,19	10,4	0,81
Morän (n=8)	0,61	0,0065	0,07	3,8	0,67



Figur 5a Observerad (tunn svart linje med prickar) och simulerad (tjock röd linje) grundvattennivå 1975-1989. Stationer i grov jord med ytlig grundvattenyta. Överst 38003 Svappavaara (grus), därunder i ordning 37050 Pålhem (sand), 23021 Tärnsjö (sand), 17009 Hallsberg (sand), 4002 Liatorp (sand). Y-axeln visar nivå i m, med markytans nivå = 0.



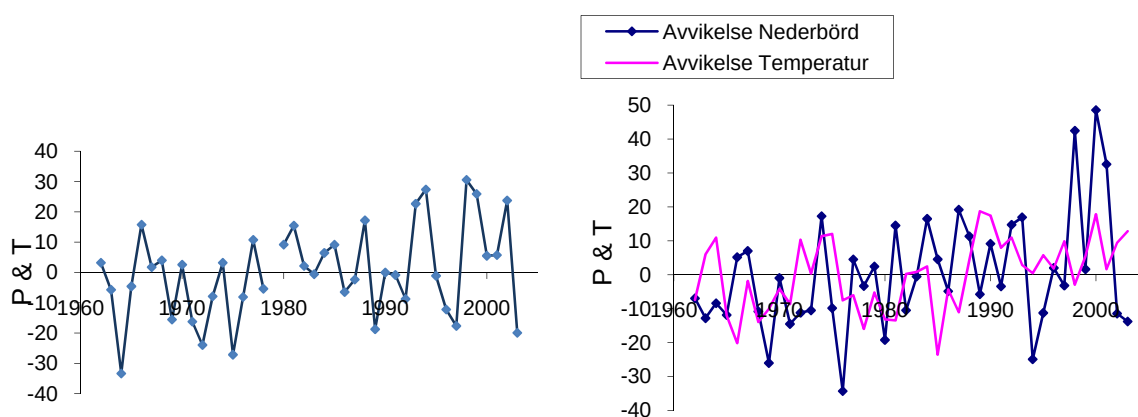
Figur 5b Observerad (tunn svart linje med prickar) och simulerad (tjock röd linje) grundvattennivå 1975-1989. Stationer i grov jord med djup grundvattenyta. 3206 Åsele överst, därunder i ordning 24006 Bollnäs, 23024 Tärnsjö, 14006 Nissafors och 41007 Sandhammaren. Samtliga stationer i sand. Y-axeln visar nivå i m med markytans nivå = 0.



Figur 5c Observerad (tunn svart linje med prickar) och simulerad (tjock röd linje) grundvattennivå 1975-1989. Stationer i morän. 32022 Åsele överst, därunder i ordning 26006 Torpshammar, 18005 Kolmården, 15008 Herrljunga och 4009 Liatorp. Samtliga stationer i sand. Y-axeln visar nivå i m med markytans nivå = 0.

Belysning av modellens giltighet i ett förändrat klimat

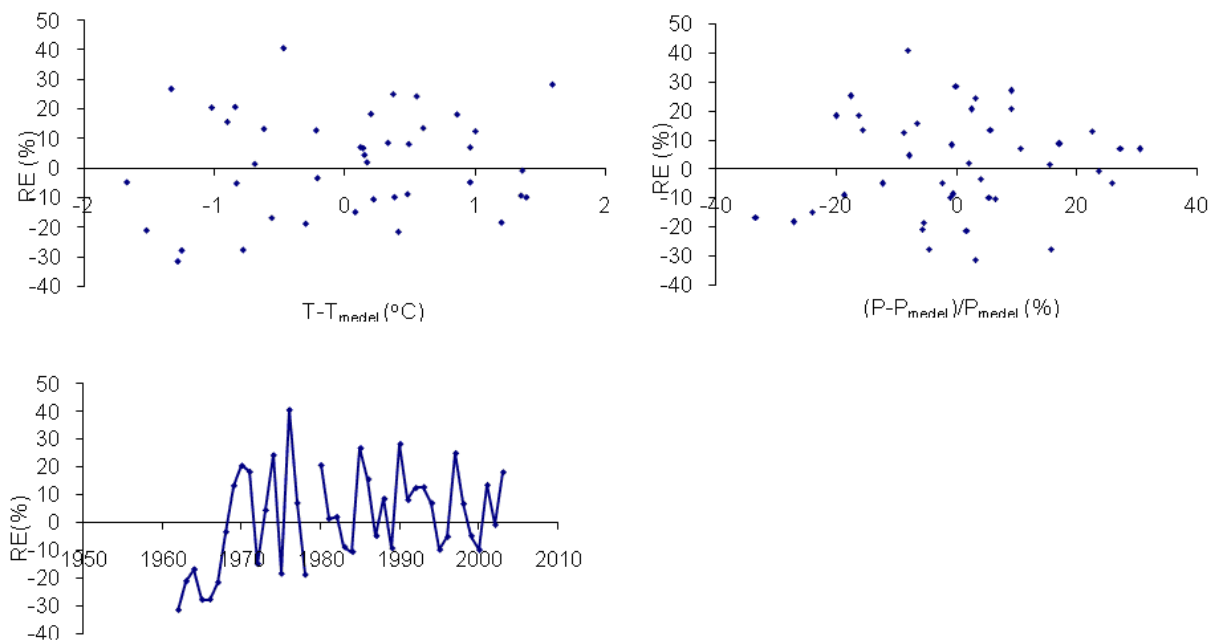
Under kalibreringsperioden för grundvattenbildningsmodellen, 1962–2003, fanns en tendens till ökande lufttemperatur och nederbörd vid de tre sydliga och tre nordliga stationer som användes för att testa modellens giltighet under andra klimatförhållanden, se exempel från Sätaryd och Björkliden i Figur 6. Enskilda årsmedeltemperaturer avvek upp till ± 2 °C från periodmedelvärdet och enskilda års nederbördssummor avvek upp till 50 %. Dessa avvikelser användes för att undersöka om modellens fel beror av klimatets variationer inom denna period med observationer och relativt stora klimatvariationer ökar om klimatet ändras. Ett starkt samband mellan väderavvikelse och fel skulle tyda på att modellen kan förväntas fungera dåligt i ett annat klimat än det som använts för kalibreringen.



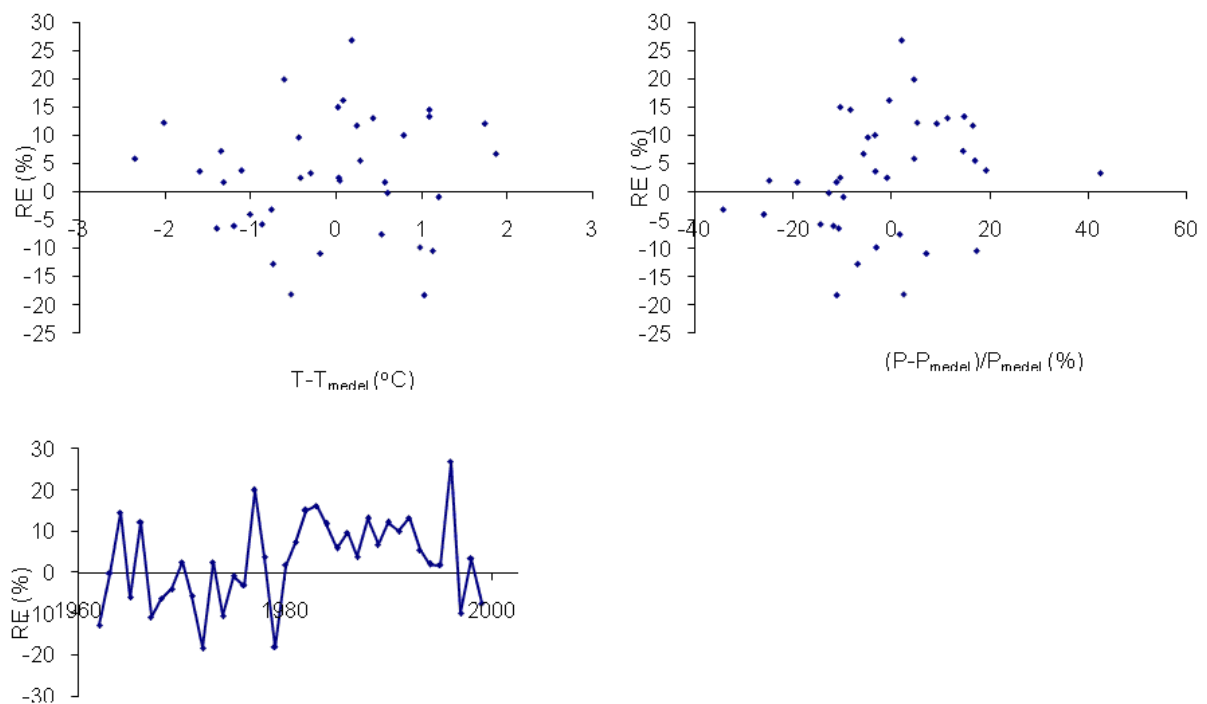
Figur 6. Observerade avvikelser i temperatur och nederbörd från periodens medelvärde. Sätaryd, NV Skåne (vänster diagram) och Björkliden, Norrbotten (höger diagram) 1962-2003. Temperaturavvikelsen (T) är angiven i 10-dels grad, nederbördsavvikelsen (P) i % av medelvärdet.

Det relativa felet i avrunnen volym kunde vara betydande för enskilda årsvärden, med en standardavvikelse varierande mellan 8 och 20 % - enheter för de 6 undersökta områdena. Det fanns inget tydligt samband mellan detta fel och temperaturens eller nederbördens avvikelse från medelvärdet, se exempel från S och N Sverige i Figur 7 a respektive 7 b. För vissa av de undersökta områdena fanns en dock tendens till ökande relativt fel med tiden, vilket kan tyda på att felet ökar när både nederbörd och temperatur ökar (Figur 7 b).

Denna enkla undersökning gav inga starka indikationer på att modellen inte gäller i ett varmare och nederbördsrikare klimat, men den visar naturligtvis inte heller att modellen gäller.



Figur 7a. Test av grundvattenbildningsmodellen: Relativt fel i simulerad årsavrinning (RE) som funktion av årets temperaturavvikelse ($T - T_{medel}$), årets nederbördsavvikelse $(P - P_{medel}) / P_{medel}$ respektive årtal. Sätaröds avrinningsområde, Helge å, NÖ Skåne.



Figur 7b. Test av grundvattenbildningsmodellen: Relativt fel i simulerad årsavrinning (RE) som funktion av årets temperaturavvikelse ($T - T_{medel}$), årets nederbördsavvikelse $(P - P_{medel}) / P_{medel}$ och årtal. Björklidens avrinningsområde, Åbyälven, Norrbotten

5. Resultat av simuleringar för ett förändrat klimat

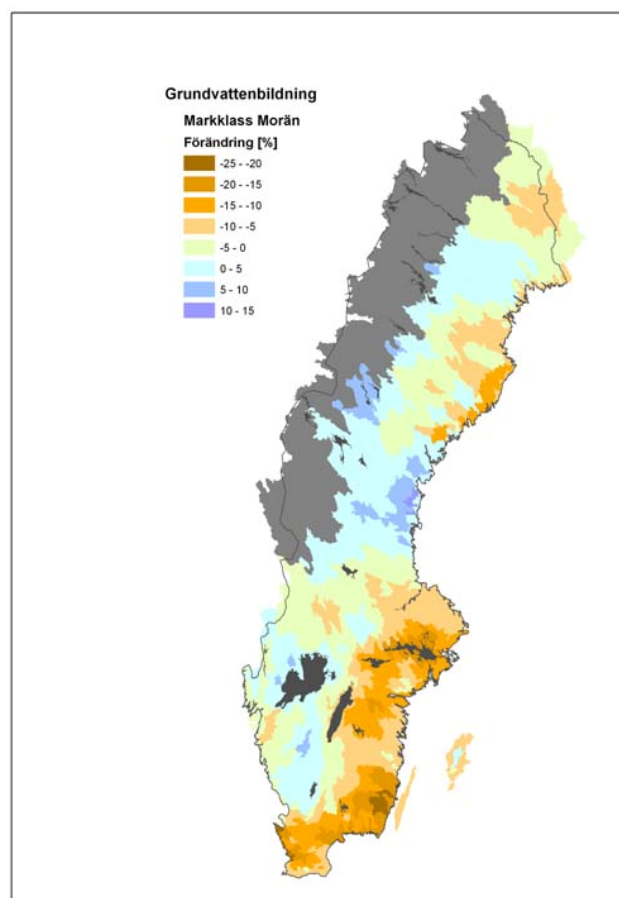
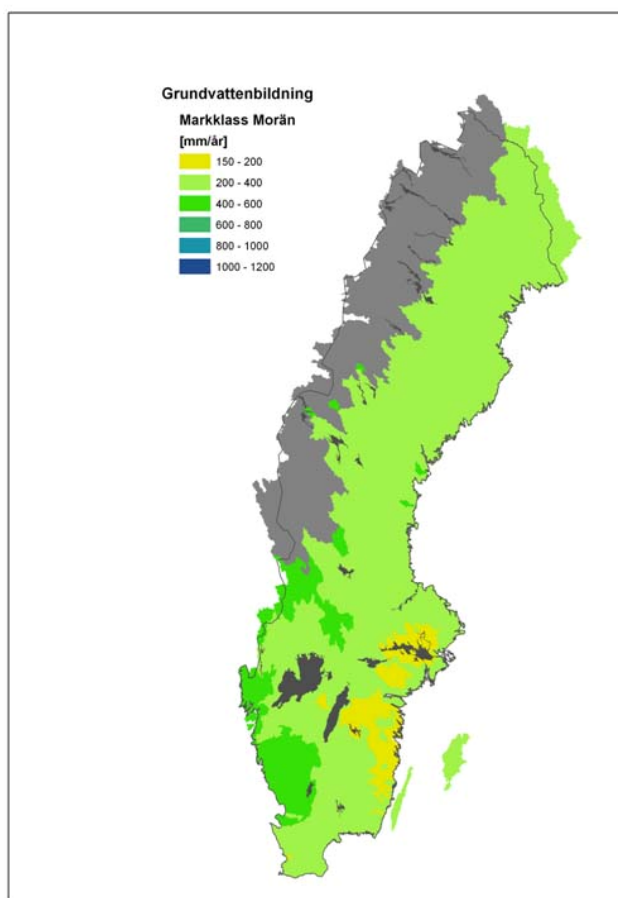
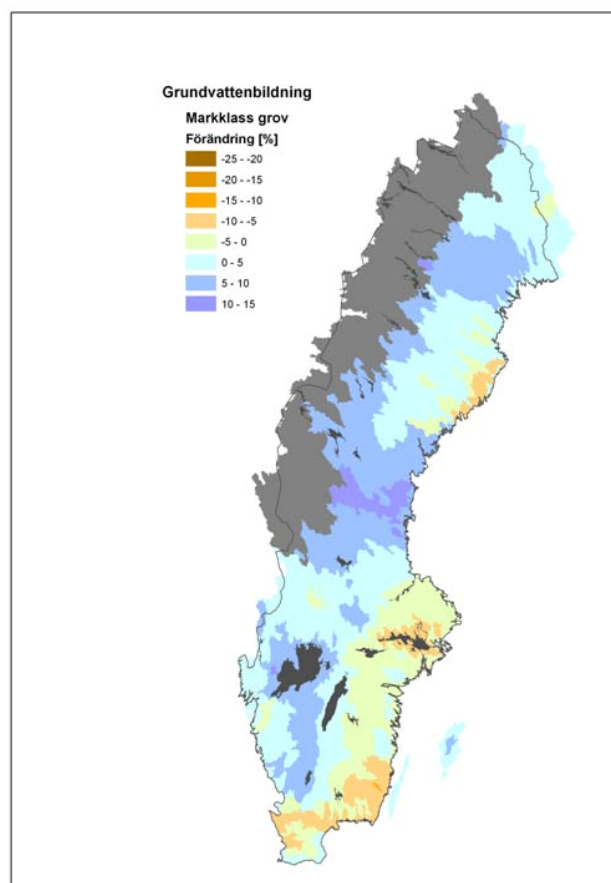
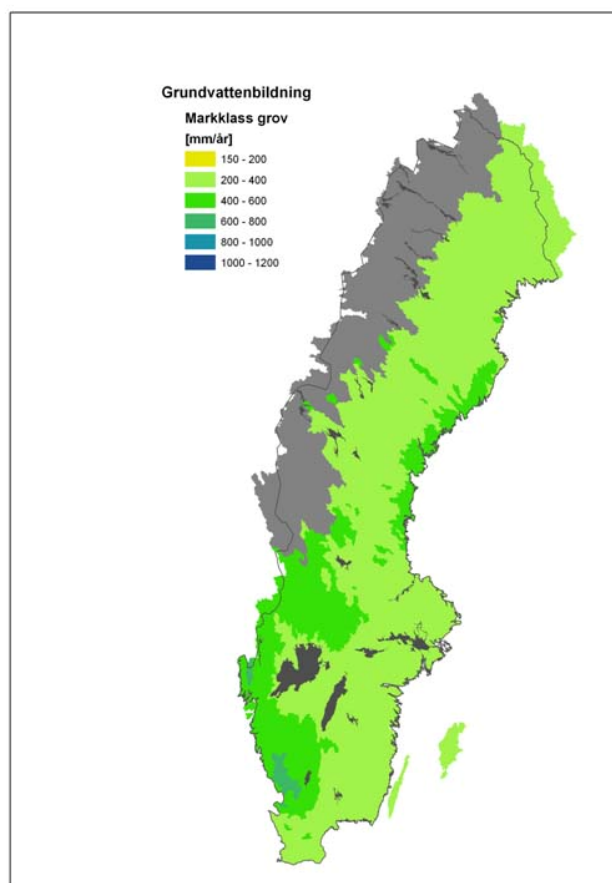
Som bakgrund till uppskattningarna av framtida grundvattenbildning och grundvattennivåer visas i Figur A1 i Appendix temperaturens och nederbördens förändring från perioden 1961-1990 till perioden 2071-2100 enligt det använda klimatscenarioet. Enligt scenarioet ökar temperaturen i landet med 4 – 7 °C, med den största ökningen i norra Sverige. Nederbörden beräknas öka med 20 – 25 % i större delen av landet.

Grundvattenbildning

Kartor över beräknad grundvattenbildning i dagens klimat med viss statistik (flerårsmedelvärde, variationskoefficient och den grundvattenbildning som statistiskt sett underskrider ett år av 10) visas i Rodhe m.fl. 2006. Kartorna visar grundvattenbildningen i tre typjordar, *grov jord*, *morän* och *fin jord*. I den nu redovisade studien studerar vi endast två typjordar, *grov jord* och *morän*, på grund av att det inte finns lämpliga grundvattennivådata för *fin jord* i den tillgängliga databasen. De kartor som visas i Figur 8 över dagens grundvattenbildning är framtagna för jämförelser med framtida grundvattenbildning och bygger därför, som tidigare nämnts, på dagens temperatur och nederbörd (1961-1990) enligt klimatscenarioet. För att markera de stora osäkerheter som finns i uppskattning av klimatförändringar och deras effekter är dessa kartor gjorda med mindre detaljupplösning än de som redovisas för dagens klimat i Rodhe m.fl. (2006).

Det regionala mönstret i den beräknade förändringen i grundvattenbildning stämmer överens med de Sverigekartor som presenterat av till exempel Andréasson m.fl. (2007) över förväntad förändring i avrinning. Detta är naturligt eftersom den modellerade grundvattenbildningen har anpassats till att stämma överens med uppmätt avrinning, men med skillnaden att grundvattenbildningen i olika jordarter har uppskattats.

Grundvattenbildningen i *grov jord* (Figur 8 övre kartor) varierar i dagens klimat mellan ca 250 mm/år i SO Sverige och över 600 mm/år i SV Sverige. Enligt uppskattningarna med klimatscenarioet kommer den att minska med 5-15 % i SO Sverige och öka med upp till 15 % i S Norrland. I *morän* (Figur 8 nedre kartor) är mönstret likartat vad gäller dagens klimat, men den årliga grundvattenbildningen är genomgående ca 50 mm lägre än i *grov jord*. Kartan över uppskattad förändring visar likartat mönster som den för *grov jord*, men områdena med minskad grundvattenbildning är större och grundvattenbildningens relativa minskning är större, upp till drygt 20 %. I områden där grundvattenbildningen förväntas öka är den relativa ökningen mindre än i *grov jord*.

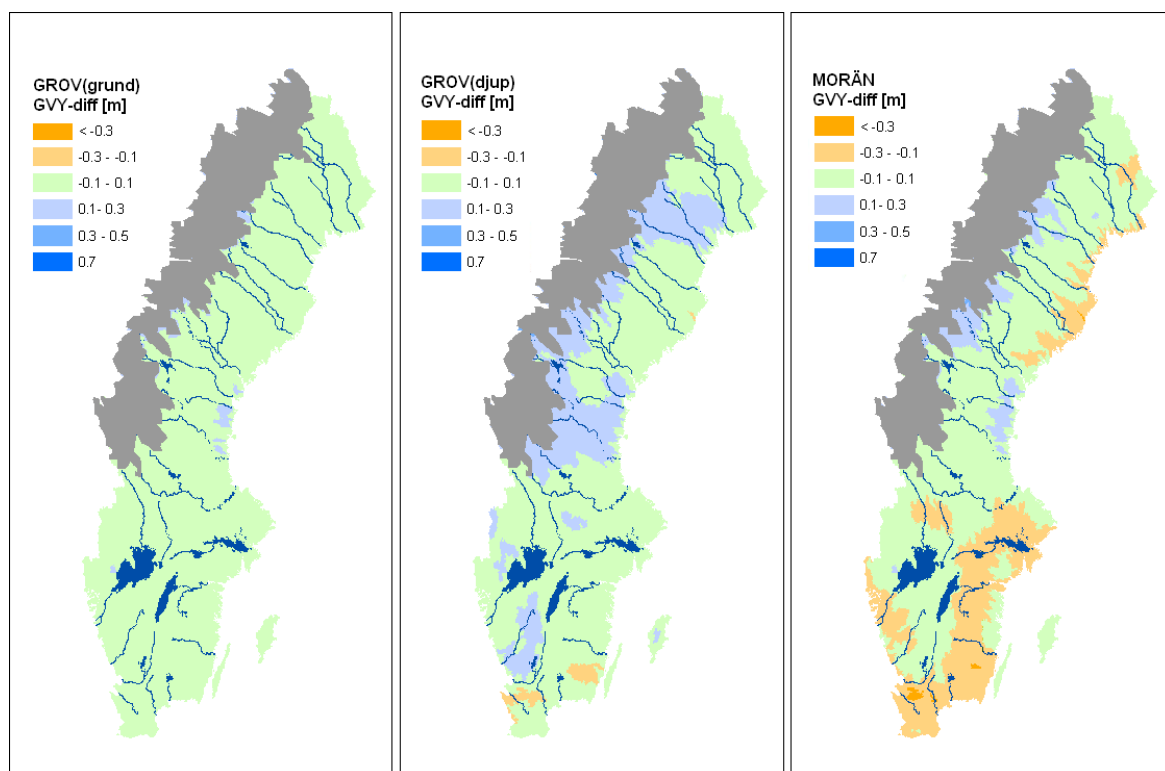


Figur 8 a. Grundvattenbildning i dagens klimat (vä)(1961-1990) och uppskattad förändring fram till 2071-2100 (hö).

Förändring av grundvattenytans medeldjup

De generaliserade parametervärden till grundvattennivåmodellen som tagits fram genom kalibrering (Tabell 1) användes för yttäckande uppskattningar av grundvattennivåer över landet med grundvattenbildning enligt klimatscenariot. Beräkningarna gjordes för de tre klasserna *grov jord med ytlig grundvattenyta*, *grov jord med djup grundvattenyta* och *morän*. De beräknade grundvattennivåernas absolutvärden saknar intresse, eftersom nivåerna i verkligheten bestäms av lokala förhållanden och nivåerna vid modellberäkningarna beror på den referensnivå som används. Den beräknade skillnaden mellan nivåer vid olika klimatförhållanden kan däremot vara av intresse.

Den uppskattade förändringen av medelgrundvattennivån (Figur 9) följer, som väntat, mönstret för grundvattenbildningens förändring (Figur 8). Nivåförändringen är måttligt stor, inom $\pm 0,1$ m för grov jord över praktiskt taget hela landet. I morän sjunker medelgrundvattennivån 0,1-0,3 m i större delen av Götaland och Östra Svealand samt i N Sveriges kustområden.



Figur 9. Uppskattad förändring av medelgrundvattennivån mellan 30-årsperioderna 1961-1990 och 2071-2100 för markklasserna *grov jord med ytlig grundvattenyta*, *grov jord med djup grundvattenyta* och *morän*. Beräkningar är inte gjorda för fjälltrakterna.

Grundvattennivåns årstidsvariation

I Figur 10 ges exempel på hur grundvattennivåns framtida årstidsvariation kan komma att se ut vid 2 stationer i vardera klasserna. I Figur 11 jämförs frekvensfördelningar av de uppskattade

grundvattennivåerna vid samma stationer under referensperioden (1960-1990) och den mest framtida 30-årsperioden (2071-2100). Motsvarande diagram för 6 stationer på olika håll i landet i vardera av de tre klasserna *grov jord med ytlig grundvattenyta*, *grov jord med djup grundvattenyta* och *morän* presenteras i Appendix, Figur A3-A5.

Skillnader i årstidsvariationen hos grundvattenbildningen (nederbörd eller snösmältning minus avdunstning) ger i dagens klimat en karakteristisk skillnad mellan grundvattennivåns årstidsvariation i norra och södra Sverige.

Nordligaste Sverige:

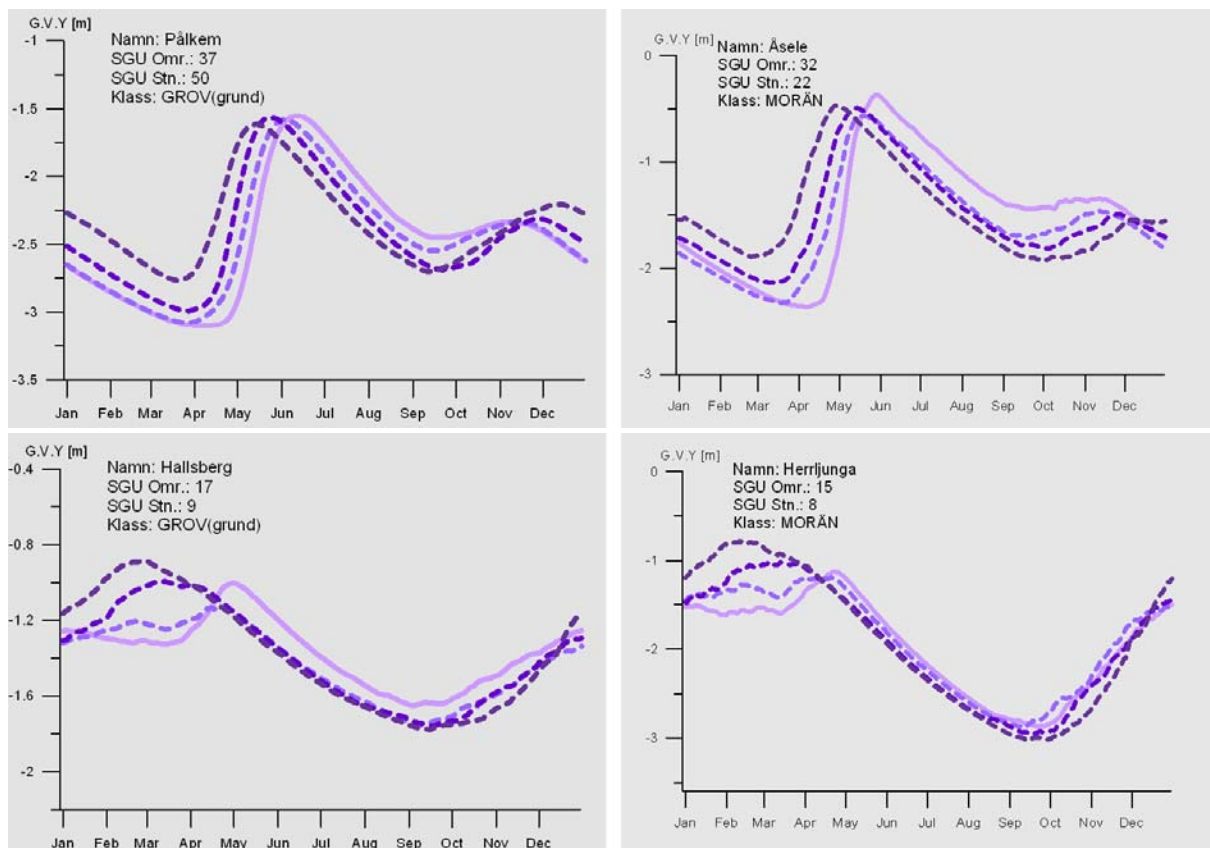
- Ingen eller obetydlig grundvattenbildning under vintern på grund av snölagring, vilket medför en lång recessionsperiod för grundvattennivån, med årets lägsta värde under senvintern.
- Årets största grundvattenbildning vid snösmältningen ger årets högsta grundvattennivåer under vår eller försommar.
- Liten grundvattenbildning ger i huvudsak recession under sommaren. Avdunstningen är dock måttlig, vilket kan ge grundvattenbildning vid stora regn.
- Minskad avdunstning under hösten gör att höstens regn ger grundvattenbildning och höjda grundvattennivåer. Höstens högvatten blir dock betydligt lägre än vårens.
- Sommarens och vinterns recessionsperiod kan vara ungefär lika långa, men eftersom sommarens recessionsperiod startar från en högre grundvattennivå blir sommarlågvattnet inte lika lågt som vinterns.

Sydligaste Sverige:

- Liten avdunstning, stor nederbörd och liten eller ingen snölagring ger stor grundvattenbildning och årets högsta grundvattennivåer under vintern.
- Stor avdunstning ger liten grundvattenbildning under sommaren, trots att nederbörden ofta är störst på sensommaren. Årets lägsta grundvattennivåer är vanligen på sensommaren eller tidig höst.

En påtaglig effekt av den förväntade klimatändringen är att det blir kortare perioder med snölagring och mindre snömagasin när vårsmältningen börjar. Vidare förväntas sommarperioderna med liten grundvattenbildning fortsätta längre in på de varmare höstarna, och höstens högvatten blir mer markerat och inträffar senare. Detta skulle för norra Sveriges del medföra att senvinterns lågvatten inte blir lika lågt som idag. Sensommarlågvattnet blir lägre än idag, på grund av längre recessionsperiod med start vid en lägre nivå än tidigare. Vinterlågvattnet fortsätter dock att vara årets lägsta. Tillsammans gör detta att grundvattennivåns variationsvidd under året minskar i norra Sverige (Tabell 2).

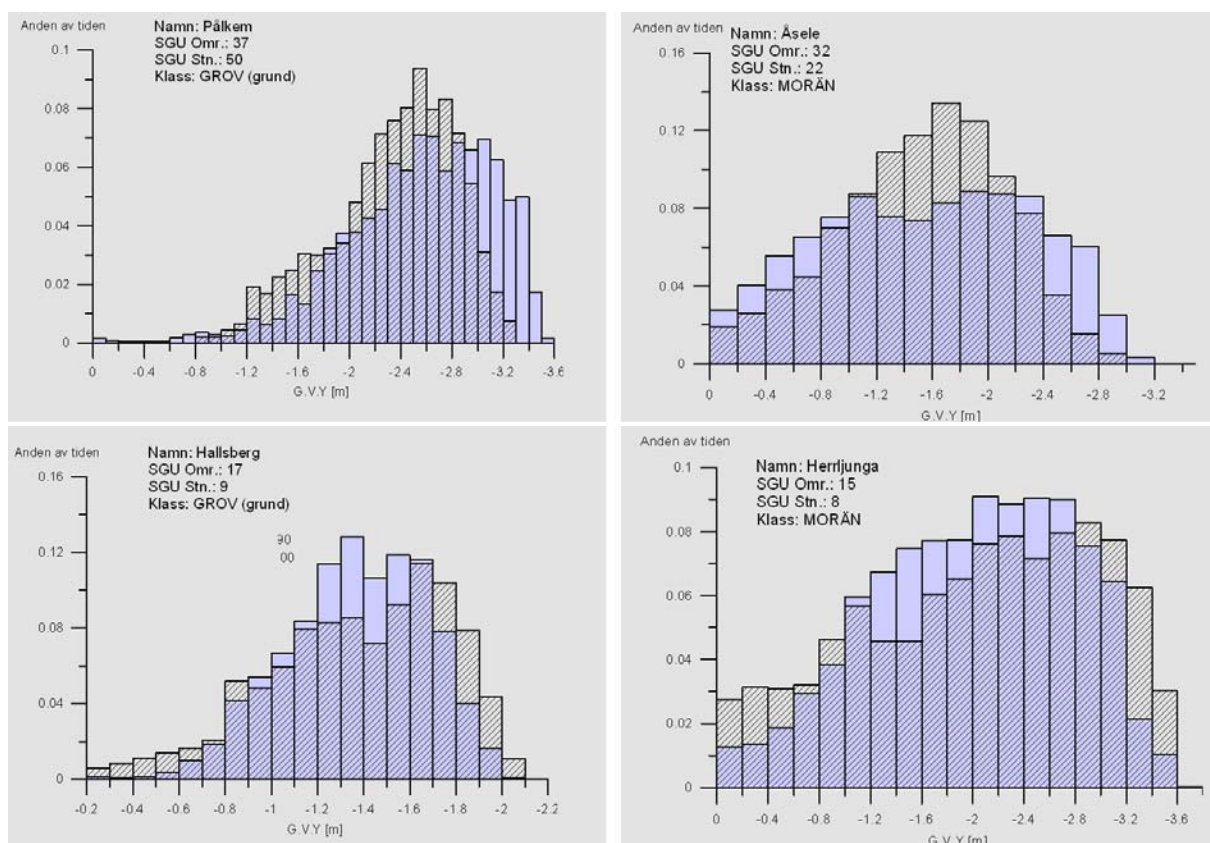
I södra och mellersta Sverige ökar i stället grundvattennivåns årliga variationsvidd på de flesta av de studerade stationerna, på grund av högre grundvattennivåer vintertid och lägre eller oförändrade nivåer sommartid.



Figur 10 Grundvattennivåns uppskattade årstidsvariation i utvalda stationer i *grov jord med ytlig grundvattenyta*, Pålkem 37050 Norrbotten och Hallsberg 17009 Närke (vänstra diagrammen), och *morän*, Åsele 32022 Västerbotten och Herrljunga 15008 Västergötland (högra diagrammen), under 30-årsperioderna från 1961-1990 till 2071-30. Kurvorna visar mediannivå för årets dygn under respektive 30-årsperiod.

Tabell 2. Grundvattennivåns uppskattade variationsvidd under åren 1991-1990 och 2071-2100 och variationsviddens relativa förändring mellan dessa perioder. Medianvärden av de enskilda årens variationsvidder under perioderna.

Station		Variationsvidd (m)		Relativ ändring (%)	
		1961-1990	2070-2100		
Svappavaara	38003	1,10	0,99	-11,2	Norr
Pålkem	37050	1,58	1,45	-9,0	
Åsele	32016	0,49	0,38	-27,6	
Åsele	32022	2,28	2,02	-12,9	
Torpshammar	26006	1,11	1,00	-10,5	
Bollnäs	24006	0,13	0,14	7,1	
Tärnsjö	23021	0,47	0,54	12,1	
Tärnsjö	23024	0,22	0,26	15,7	
Hallsberg	17009	0,95	1,13	15,6	
Kolmården	18005	1,99	1,91	-4,5	
Herrljunga	15008	2,50	3,07	18,6	Söder
Nissafors	14006	0,57	0,66	14,4	
Liatorp	4002	1,18	1,23	4,1	
Liatorp	4009	0,99	1,03	3,4	
Sandhammaren	41007	0,33	0,28	-16,1	



Figur 11 Exempel på frekvensfördelningar för uppskattade grundvattennivåer i *grov jord med ytlig grundvattenyta*, Pålken 37050 Norrbotten och Hallsberg 17009 Närke (vänstra diagrammen) och *morän*, Åsele 32022 Västerbotten och Herrljunga 15008 Västergötland (högra diagrammen), under 30-årsperioderna från 1961-1990 och 2071-30.

Frekvensfördelningarna (Figur 10 och Figur A3b-A5b) visar att i norr kan de låga grundvattennivåerna komma att förekomma mer sällan, under det att de medelhöga nivåerna blir vanligare. I söder blir såväl de låga som de höga nivåerna vanligare på de flesta av de undersökta stationerna, på bekostnad av de medelhöga nivåerna.

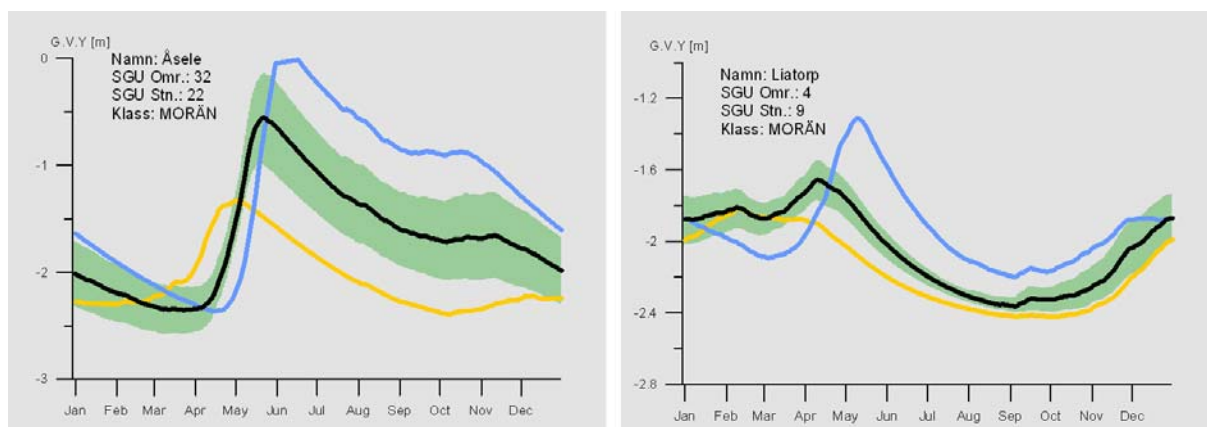
Känslighet för förändring i temperatur och nederbörd

De beräknade grundvattennivåernas känslighet för en systematisk förändring av lufttemperaturen respektive nederbörden undersöktes genom att varje dygns lufttemperatur under referensperioden 1961-1990 höjdes respektive sänktes med 2,5 °C och nederbörden under dygn med nederbörd höjdes respektive sänktes med 15%. Beräkningarna gjordes med förändringar av en variabel i taget, se exempel i Figur 12. (Alla beräkningar visas i Appendix Figur A3a-c.) Nedanstående kommentarer gäller beräkningar för *grov jord med ytligt grundvattenyta* och *morän*. För klassen *grov jord med djup grundvattenyta* var mönstret inte lika tydligt.

Lufttemperaturens inverkan på beräkningarna är i princip lika i norr och söder. Ökad temperatur ger naturligtvis kortare snölagringsperiod, mindre snömagasin samt tidigare och lägre vårhögvattnet. Vinterlågvattnet blir högre eller oförändrat. Den högre lufttemperaturen ger

generellt högre avdunstning och därigenom större årlig grundvattenbildning, vilket sänker grundvattnets medelnivå. Grundvattennivåns variationsvidd minskar vid ökande temperatur, utom vid vissa av de sydliga stationerna. Minskad temperatur ger motsatta effekter på grundvattennivån.

Ökad respektive minskad nederbörd medför i stort sett parallellförskjutningar av grundvattennivåns tidsserie uppåt respektive nedåt, med förskjutningar på 0,1-0,4 m från dagens nivå. Att nivån ändras även under perioder med liten eller ingen grundvattenbildning beror främst på att tidpunkten och startvärdet för recessionen ändras.



Figur 12. Känslighet hos beräknade grundvattennivåer för ändring i lufttemperatur respektive nederbörden för två stationer i morän, Åsele (N Sverige) och Liatorp (S Sverige), under referensperioden 1961-1990. Kurvorna visar mediannivån för årets dygn under 30-årsperioden. Svart kurva: originaldata. Blå och gul kurva: lufttemperaturen minskad respektive ökad med 2,5 °C. Det gröna fältets övre och nedre begränsningar representerar beräkningar med nederbörden +15% respektive -15%.

6. Diskussion

Grundvattennivåmodellen är mycket enkel. Trots omfattande kalibreringsförsök lyckades vi inte hitta en bra metod för automatisk optimering av parametervärden. Modellen har få parametrar, men dessa är starkt beroende av varandra. En för hög effektiv porositet kan till exempel kompenseras av för låg recessionshastighet. Att optimera det inom hydrologiska tillämpningar vanligen använda R2-värdet fungerade för flera rör mindre bra, och ledde till att den simulerade grundvattennivåns variationer blev för låga. Att kalibrera modellen manuellt fungerade däremot bra och var enkelt.

I den första fasen av detta arbete gjordes en modell för grundvattenbildning som byggde på anpassning mot uppmätt avrinning från ett stort antal avrinningsområden. Kontrollen mot uppmätta grundvattennivåer gav ytterligare en kontroll av rimligheten i de tidigare beräknade grundvattenbildningarna. En tendens till att grundvattenbildningen underskattades kalla, regniga somrar (eller mer generellt perioder där markfuktigheten är hög utan att fältkapacitet uppnås) påvisades. Detta var väntat eftersom denna enkla modell antar att ingen grundvattenbildning sker innan fältkapacitet uppnås. En gradvis ökande grundvattenbildning med ökande markfuktighet

testades, dock utan att resultaten förbättrades markant. I denna enkla grundvattennivåmodell behölls därför den beräknade grundvattenbildningen från det första projektet.

En analys av hur väl modellen beskriver grundvattenbildningen under olika år; torra respektive böta år och kalla respektive varma år, avslöjade inga tydliga samband mellan de relativa felen i beräkningarna och klimatet. Detta ökar trovärdigheten i scenarioberäkningarna.

I beräkningarna valde vi ett transient scenario från Rosbycentret på SMHI. Det är viktigt att komma ihåg att det är ett scenario, inte en prognos för framtiden. Resultaten från olika scenarier skiljer sig åt, och användandet av detta scenario bör därför kompletterades med andra. Det regionala mönstret i den beräknade förändringen i grundvattenbildning stämmer överens med de Sverige kartor som presenterat av till exempel Andréasson m.fl. (2007) över förväntad förändring i avrinning. Detta är naturligt eftersom den modellerade grundvattenbildningen har anpassats till att stämma överens med uppmätt avrinning, men med skillnaden att grundvattenbildningen i olika jordarter har uppskattats.

Resultaten tyder på att den beräknade grundvattenbildningen är känslig för scenariots klimatändring. Grundvattenbildningen minskar betydligt i östra Götaland och Svealand, framförallt i morän, där fältkapacitet mer sällan uppnås än i den grova jorden. Den ökade nederbörden som scenariot ger överskuggas av effekten av den beräknade potentiella avdunstningens ökning, med minskad grundvattenbildning som följd. Förenklingen att ingen grundvattenbildning sker förrän mättnad uppnås kan sannolikt leda till en överskattad minskning av grundvattenbildningen. Den använda modellen potentiell avdunstning ger en kraftigt ökad avdunstning om temperaturen ökar, vilket vara en överskattning. Modellen har dock visat sig fungera relativt bra i dagens klimat.

7. Slutsatser

Observerade grundvattennivåer kunde förhållandevis väl simuleras med hjälp av den modell för grundvattenbildning som tagits fram i tidigare projekt.

Det använda klimatscenariot gav mindre grundvattenbildning och därmed lägre grundvattennivåer (upp till 0,3 m sänkning av medelnivån i morän) i landets södra del, speciellt i den sydöstra delen, och längs norra delen av Norrlandskusten.

Grundvattennivåns variationsvidd under året minskade enligt klimatscenariot i norra Sverige, beroende på mindre lågt vinterlågvattnet. I södra Sverige ökade variationsvidden något.

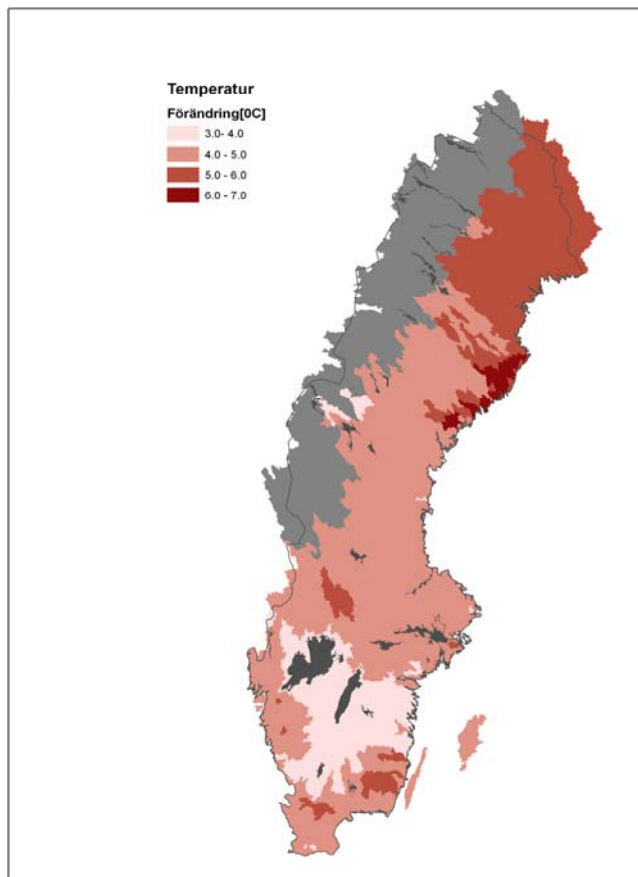
Referenser

- Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. and Lindström, G. (2004) Hydrological Change - Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio*, Volume XXXIII, Number 4-5, June 2004, pp. 228-234.
- Andréasson, J., Hellström, S-S., Rosberg, J. & Bergström, S. (2007) Översiktlig kartpresentation av klimatförändringars påverkan på Sveriges vattentillgång - Underlag till Klimat- och sårbarhetsutredningen. SMHI Hydrologi Nr 106.
- Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping.
- Bergström, S. and Sandberg, G. (1983) Simulation of groundwater response by conceptual models - Three case studies. *Nordic Hydrology*, 14, 71-84.
- Hay, L.E., Wilby, R.L. and Leavesley, G.H., (2000) A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2): 387-398.
- IPCC (2007) IPCC Working Group I Fourth Assessment Report Summary for Policymakers (SPM), http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/docs/WG1AR4_SPM_Approved_05Feb.pdf.
- Johansson, B. (2002) Estimation of areal precipitation for hydrological modelling in Sweden. Earth Sciences Centre, Department of Physical Geography, Göteborg University. Doctoral Thesis A76.
- Liao Y., Q. Zhang and Chen, D. (2004) Stochastic modeling of daily precipitation in China. *Journal of Geographical Sciences*, 14(4), 417-426.
- 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.
- Rodhe, A., Lindström, L., Rosberg, J. och Pers, C. (2006) Grundvatten i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell, Rapport Serie A No. 66, Uppsala universitet, Inst. för geovetenskaper, Luft- och vattenlära, Uppsala. http://www.hyd.uu.se/allan/grundvattenbildning_typjordar.doc
- Rodhe, A., Lindström, G., Dahné, J. (2008) Grundvattenbildning i svenska typjordar - metodutveckling av en vattenbalansmodell, Rapport Serie A No.68, Uppsala universitet, Inst. för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala.
- Rosberg, J. and Andréasson, J. (2006) From delta change to scaling and direct use of RCM output. European Conference on Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources.
- Wetterhall, F., Bárdossy, A., Chen, D., Halldin, S., Xu, C.-Y., (2006) Daily precipitation downscaling techniques in different climate regions in China. *Water Resources research*, 42, W11423, doi:10.1029/2005WR004573.
- Wilby, R. L. (2005) Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment, *Hydrological Processes*, 19(16), 3201-3219.

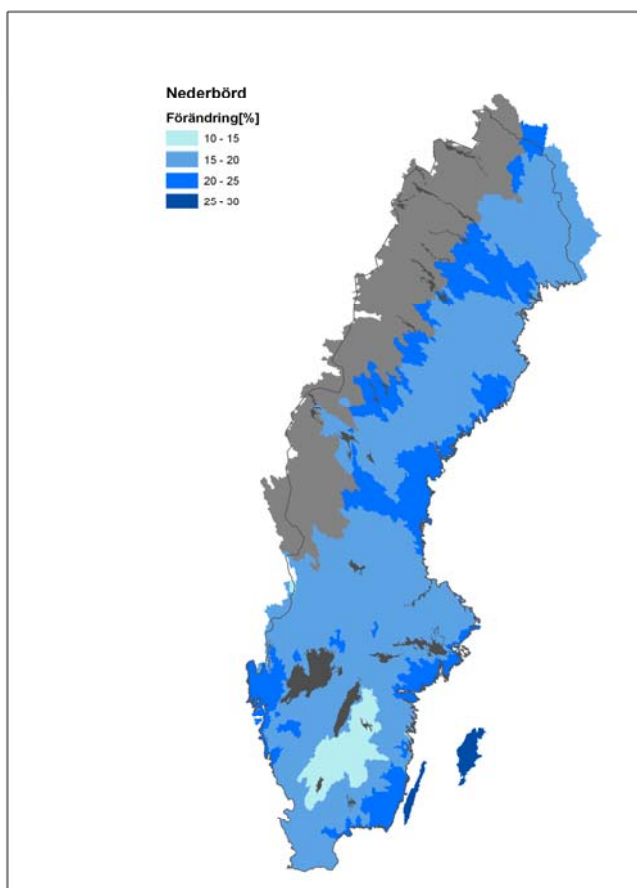
Appendix

Figurer över

- Förändring av lufttemperatur och nederbörd enligt klimatscenariot
- Grundvattennivåns uppskattade årstidsvariation i utvalda stationer
- Frekvensfördelning för uppskattade grundvattennivåer i utvalda stationer
- Känslighet hos beräknade grundvattennivåer ändring av lufttemperaturens respektive nederbörd

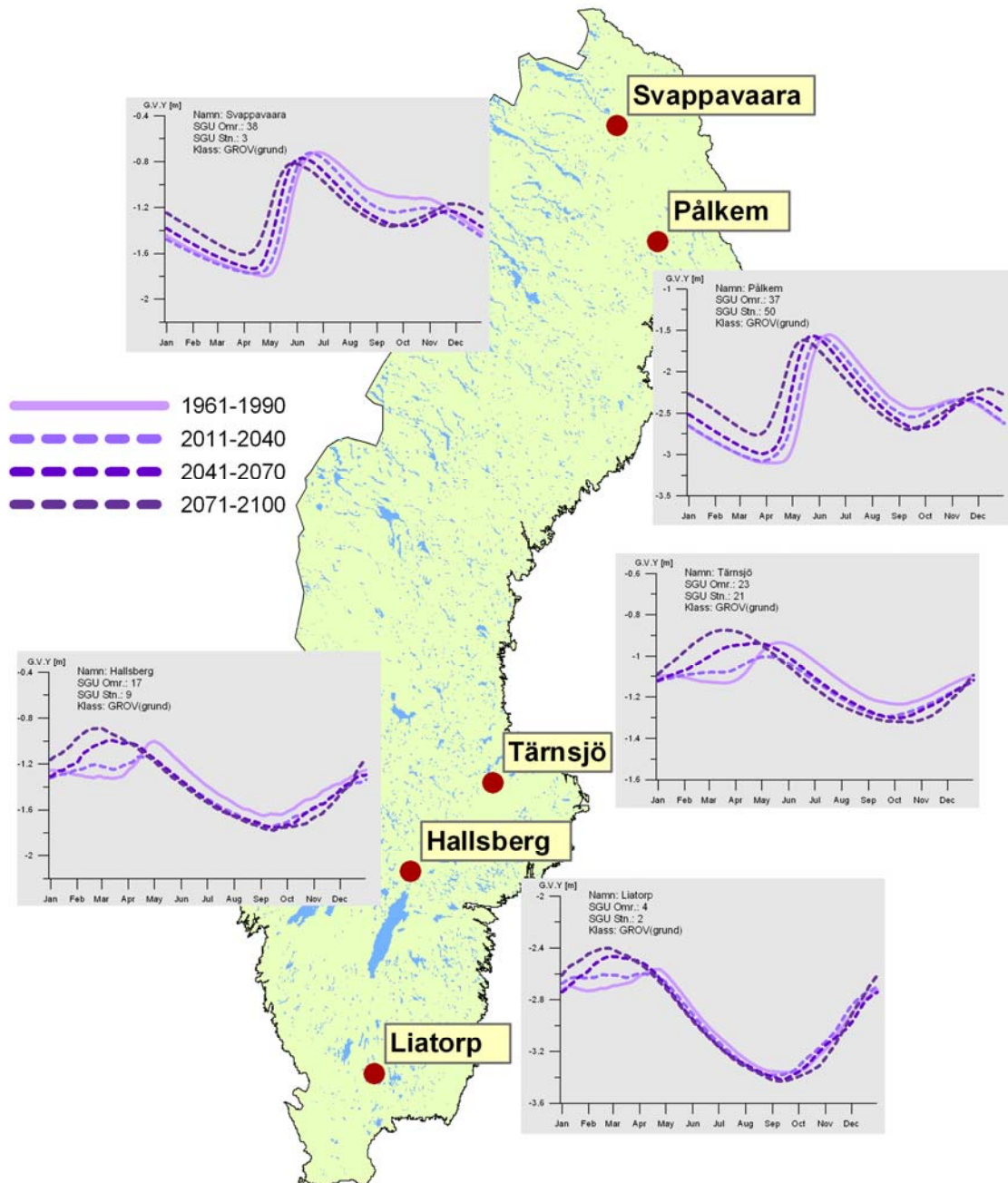


Figur A1. Förändring av lufttemperatures årsmedelvärde mellan 30-årsperioderna 1961-1990 och 2071-2100 enligt bearbetning av klimatscenario RCA3, ECHAM 5:3, A1b



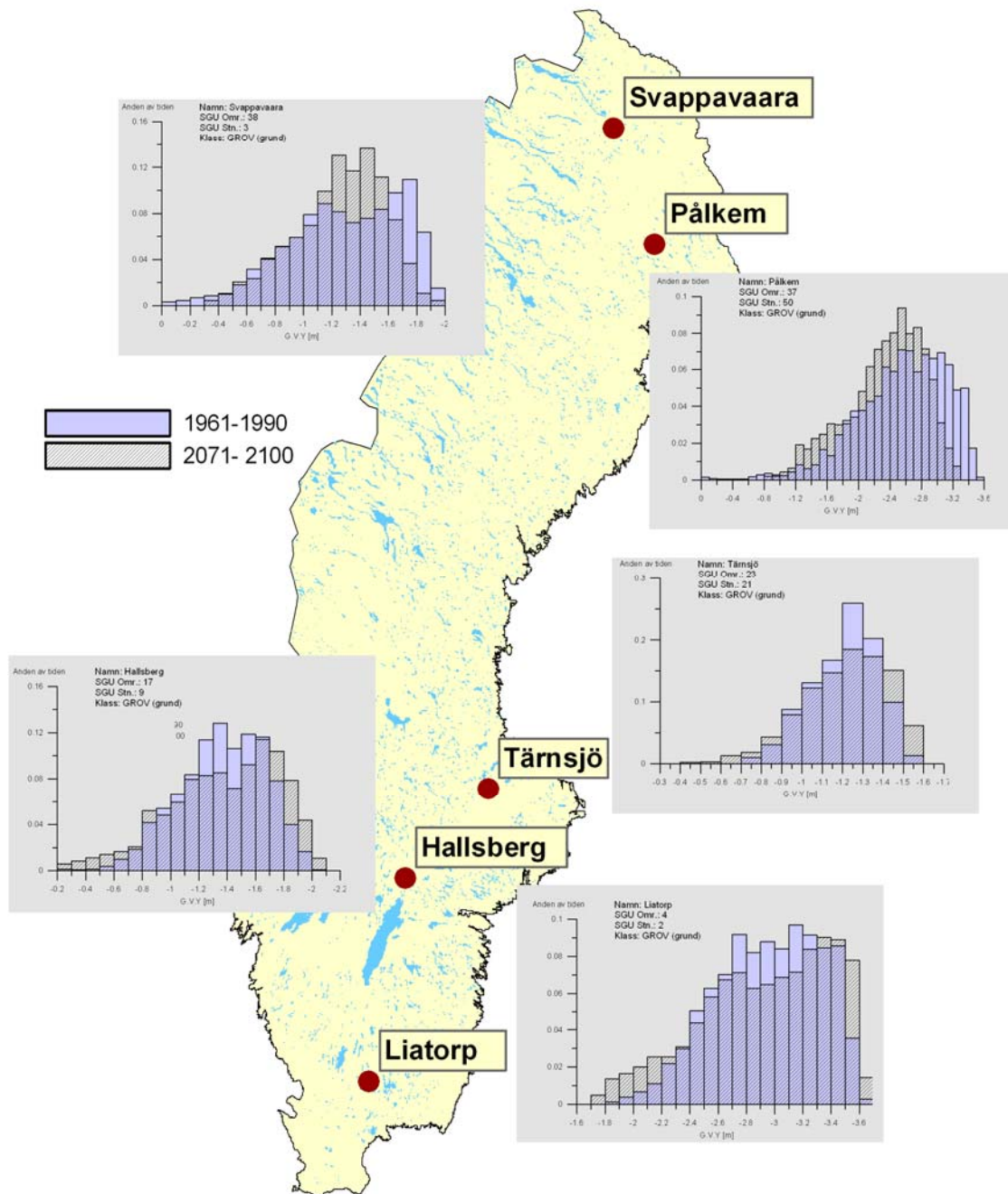
Figur A2. Relativ förändring av nederbördens årssumma mellan 30-årsperioderna 1961-1990 och 2071-2100 enligt bearbetning av klimatscenario RCA3, ECHAM 5:3, A1b

SCENARIO för klass GROV(grund)
RCA3, ECHAM5:3, A1B



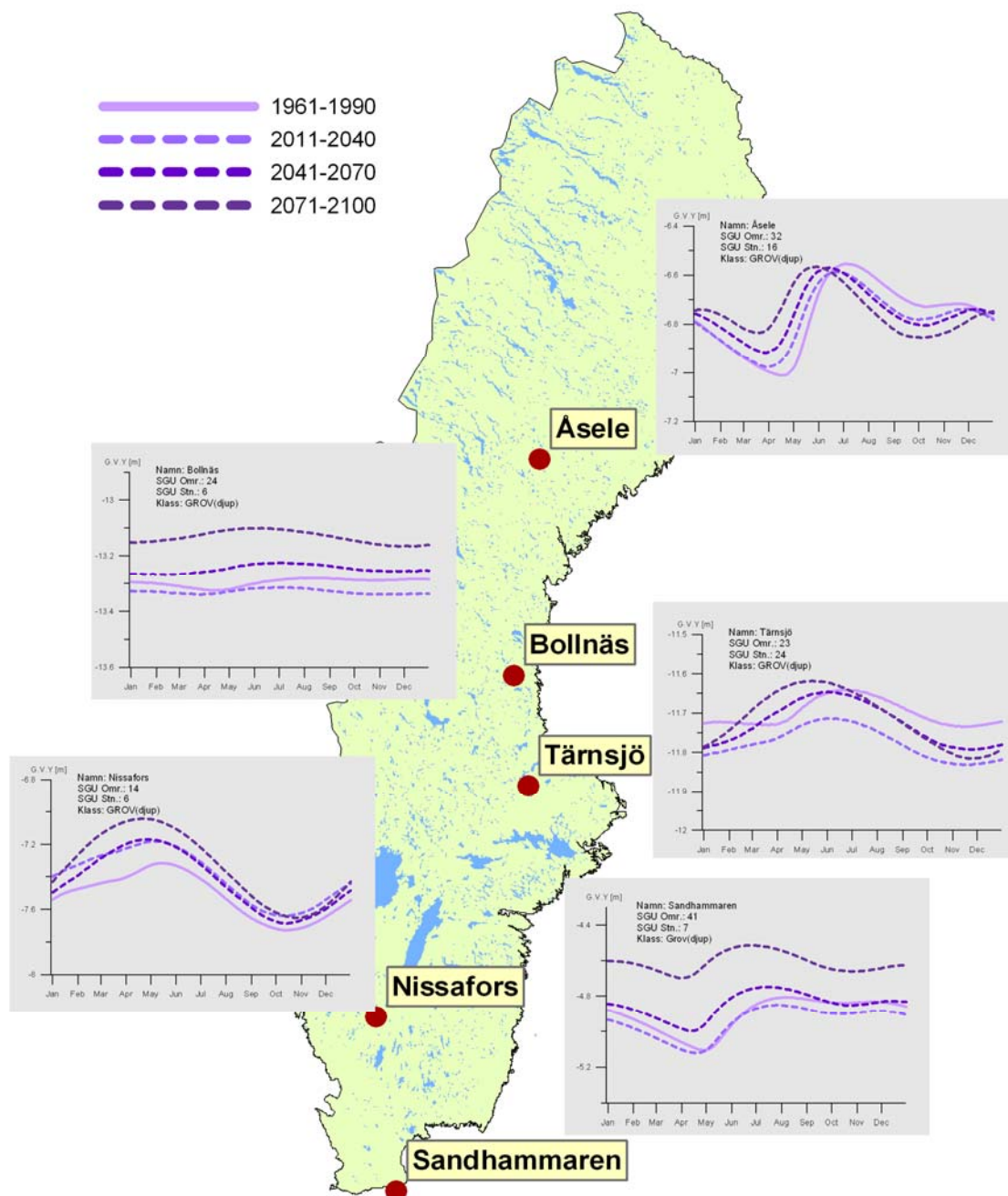
Figur A3a Grundvattennivåns uppskattade årstidsvariation i utvalda stationer i *grov jord med yttlig grundvattenyta* under 30-årsperioderna från 1961-1990 till 2071-30. Kurvorna visar mediannivån för årets dygn under respektive 30-årsperiod.

Frekvensanalys för klass GROV(grund)



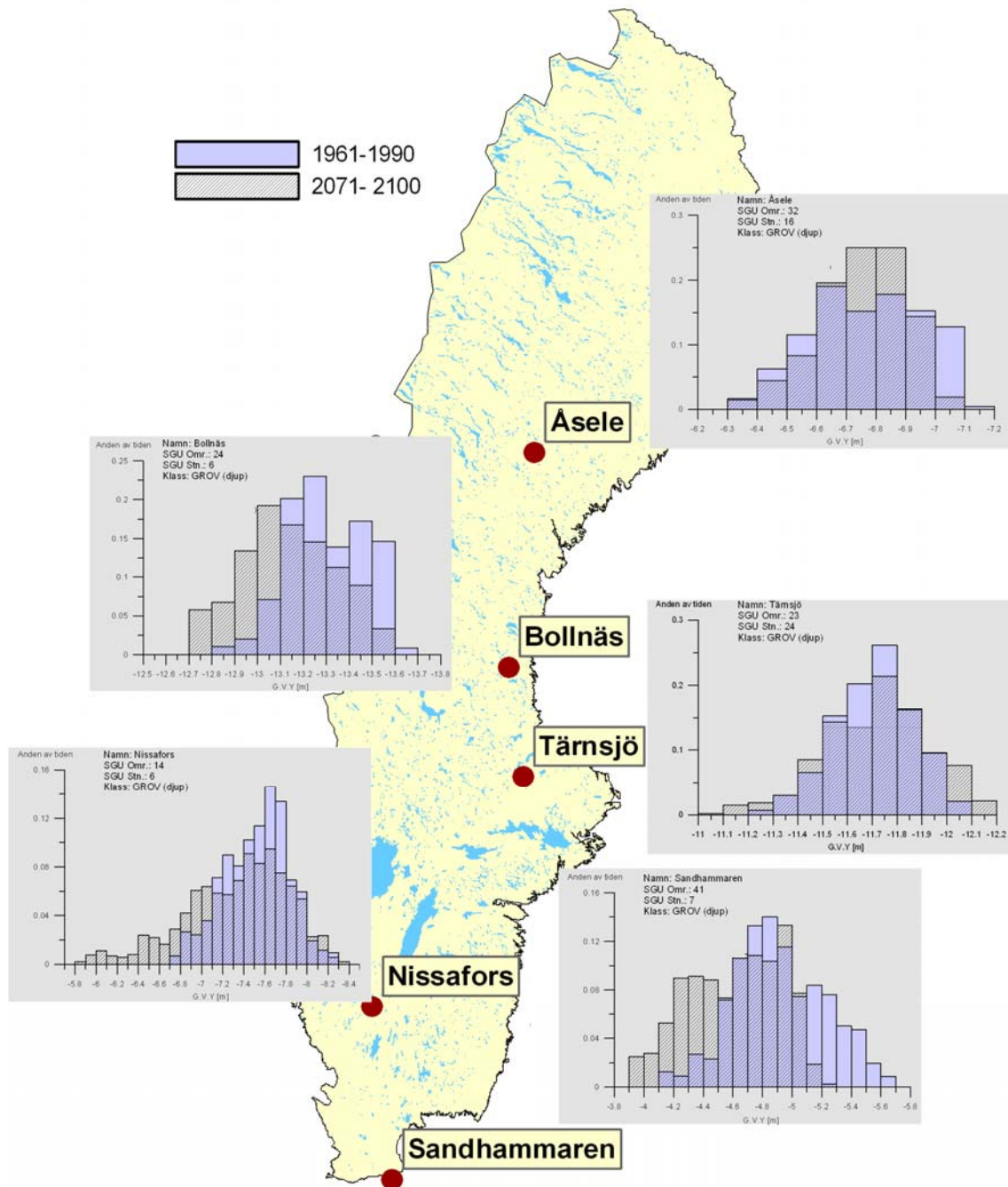
Figur A3b Frekvensfördelning för uppskattade grundvattennivåer i utvalda stationer i *grov jord med ytlig grundvattenyta* under 30-årsperioderna 1961-1990 och 2071-30.

SCENARIO för klass GROV(djup) RCA3, ECHAM5:3, A1B



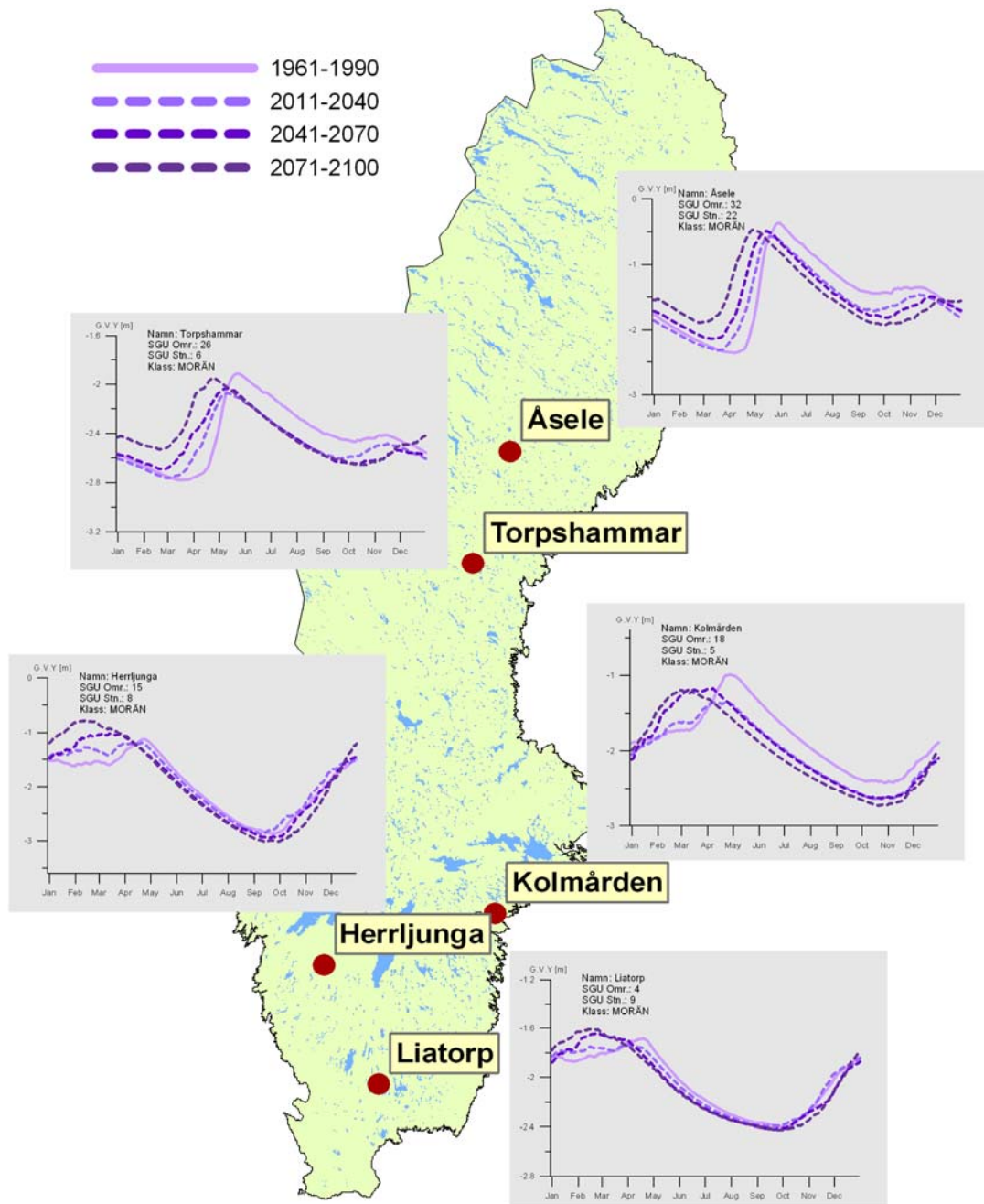
Figur A4 a Grundvattennivåns uppskattade årstidsvariation i utvalda stationer i *grov jord med djup grundvattenyta* under 30-årsperioderna från 1961-1990 till 2071-30. Kurvorna visar mediannivån för årets dygn under respektive 30-årsperiod

Frekvensanalys för klass GROV(djup)



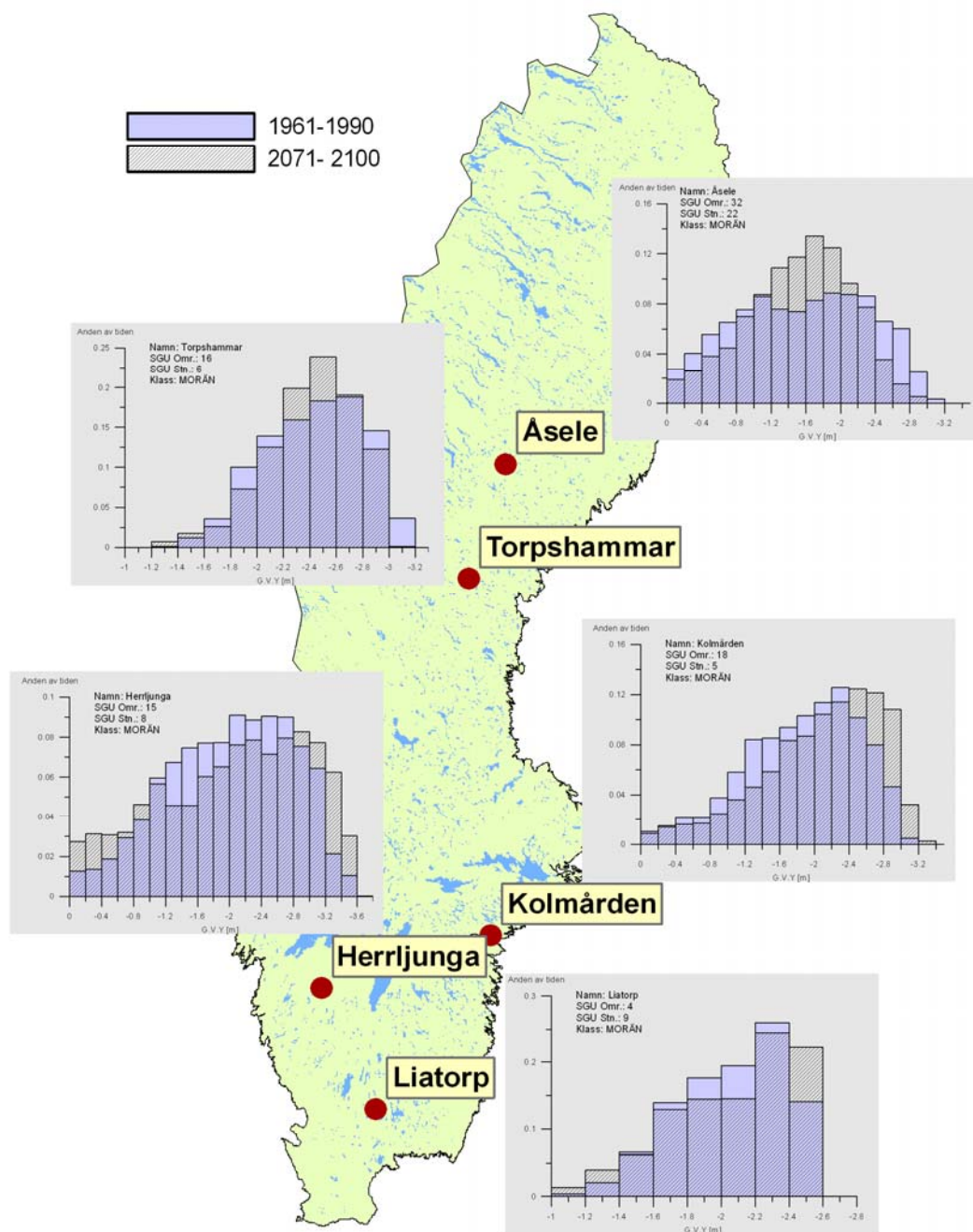
Figur A4b Frekvensfördelning för uppskattade grundvattennivåer i utvalda stationer i *grov jord med djup grundvattenyta* under 30-årsperioderna 1961-1990 och 2071-30.

SCENARIO för klass MORÄN RCA3, ECHAM5:3, A1B



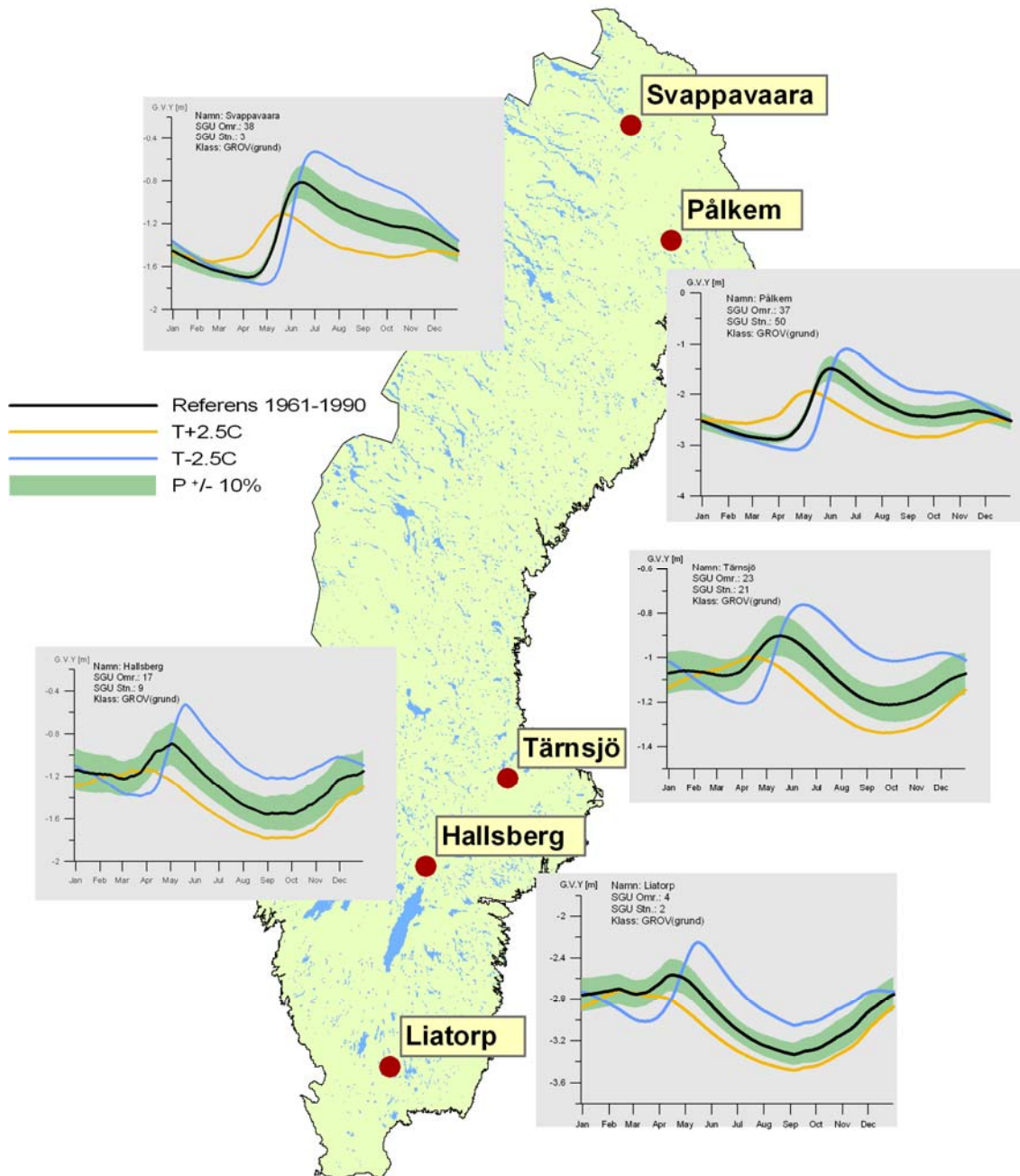
Figur A5a Grundvattennivåns uppskattade årstidsvariation i utvalda stationer i *morän* under 30-årsperioderna från 1961-1990 till 2071-30. Kurvorna visar mediannivån för årets dygn under respektive 30-årsperiod.

Frekvensanalys för klass MORÄN



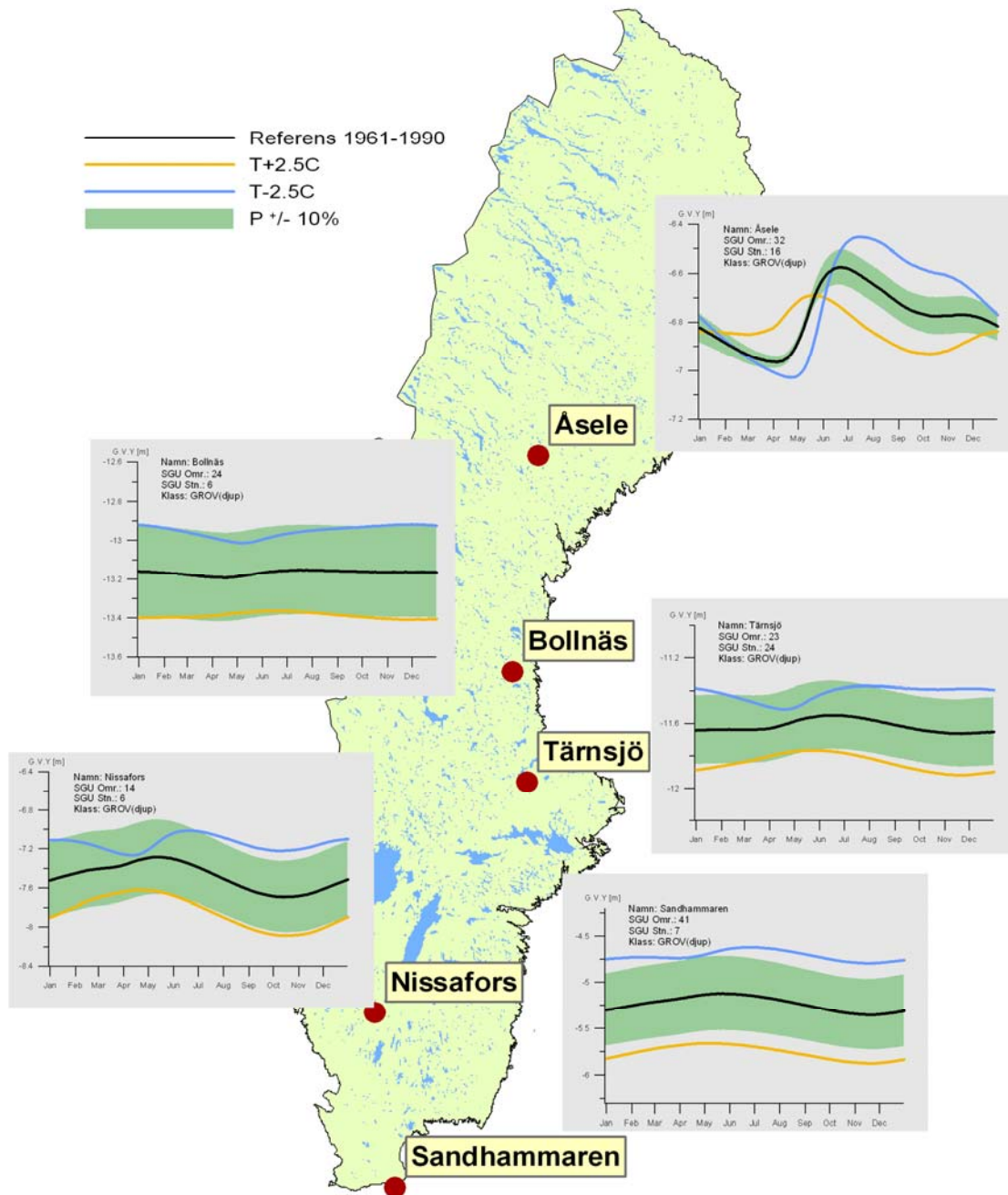
Figur A5b Frekvensfördelning för uppskattade grundvattennivåer i utvalda stationer i *morän* under 30-årsperioderna 1961-1990 och 2071-30.

Känslighetsanalys för klass GROV(grund)



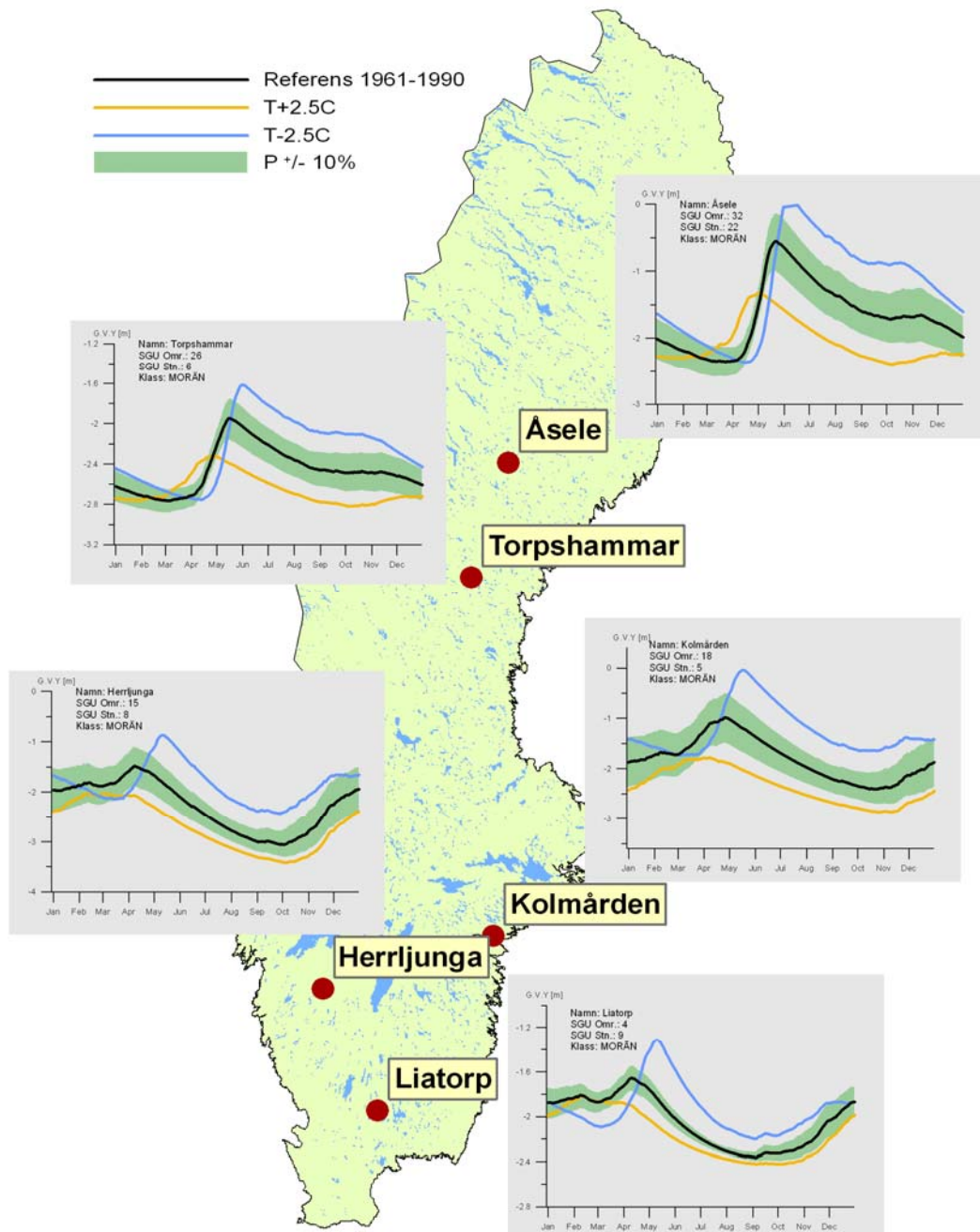
Figur A6 Känslighet hos beräknade grundvattennivåer för lufttemperaturens ändring $\pm 2,5$ °C respektive nederbördens ändring $\pm 10\%$. Grov jord med yttlig grundvattennivå, referensperioden 1961-1990. Kurvorna visar mediannivån för årets dygn under 30-årsperioden. Det gröna fältets övre och neder begränsningar representerar beräkningar med nederbörden +15% respektive -15%.

Känslighetsanalys för klass GROV(djup)



Figur A7 Känslighet hos beräknade grundvattennivåer för lufttemperaturens ändring $\pm 2,5$ °C respektive nederbördens ändring $\pm 10\%$. *Grov jord med djup grundvattenyta*, referensperioden 1961-1990. Kurvorna visar medannivån för årets dygn under 30-årsperioden. Det gröna fältets övre och neder begränsningar representerar beräkningar med nederbörden +15% respektive -15%.

Käsnlighetsanalys för klass MORÄN



Figur A8 Käsnlighet hos beräknade grundvattennivåer för lufttemperaturens ändring $\pm 2,5$ °C respektive nederbördens ändring $\pm 10\%$. *Morän*, referensperioden 1961-1990. Kurvorna visar mediannivån för årets dygn under 30-årsperioden. Det gröna fältets övre och neder begränsningar representerar beräkningar med nederbörden +15% respektive -15%.