



*Allan Rodhe
Göran Lindström
Jörgen Rosberg
Charlotta Pers*

Grundvattenbildning i svenska typjordar

- översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell

Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell

Allan Rodhe¹, Göran Lindström², Jörgen Rosberg² och Charlotta Pers²

¹) Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala

²) Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, Norrköping

Slutrapport från SGU-projektet "Grundvattenbildning i svenska typjordar"
proj nr 60-1375/2004

ISSN 1400-1055

Copyright © 2006, Allan Rodhe, Göran Lindström, Jörgen Rosberg, Charlotta Pers och
Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Tryckt i oktober 2006 av Geotryckeriet, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell

Allan Rodhe, Göran Lindström, Jörgen Rosberg och Charlotta Pers

Sammanfattning

En vattenbalansmodell för beräkning av grundvattenbildningen i svenska jordar har utvecklats och kartor över grundvattenbildningens storlek i olika jordar har tagits fram. Beräkningarna bygger på utnyttjandet av landsomfattande databaser över jordarter och markanvändning samt tidsserier av vattenföring och ytinterpolerad nederbörd och lufttemperatur. Modellen är en förenklad variant av HBV-modellens markvattenrutin. Allt regn eller snösmältning antas infiltrera i rotzonen och antingen avdunsta, lagras tillfälligt eller perkolera och bilda grundvatten. När rotzonens vatteninnehåll är lika med modellparametern fältkapacitet är avdunstningen potentiell och perkolationen är lika med all ytterligare vattentillförsel. När vatteninnehållet är mindre än fältkapacitet sker ingen perkolation och avdunstningens andel av den potentiella minskar linjärt med minskat markvatteninnehåll.

I ett första steg kalibrerades modellen för att ta fram samband mellan jordart och vattenhållande egenskaper hos jorden (i modellen beskrivet av parametern fältkapacitet). Modellen kalibrerades mot avrinningens årsvärden i 161 mindre (<2000 km²) avrinningsområden över landet. Härvid antogs den sammanlagda årsavrinningen från ett avrinningsområde vara lika med summan av grundvattenbildningen i dess delområden med olika jordarter. Vid den slutgiltiga kalibreringen slogs jordarterna samman till tre så kallade markklasser, grov jord, morän och fin jord, utan hänsyn till markanvändningen skog/öppen mark. Till dessa klasser kom klassen sjö+torv, vilken antogs sakna markvattenmagasin och från vilken avdunstningen ständigt antogs vara potentiell. I ett andra steg användes de framkalibrerade värdena på fältkapacitet för att beräkna grundvattenbildningen över landet med hjälp av rikstäckande tidsserier av nederbörd och lufttemperatur.

Ett speciellt problem var att få yttäckande tidsserier av den potentiella avdunstningen. En enkel modell med vilken den potentiella avdunstningen beräknades ur lufttemperatur utvecklades och användes vid kalibreringen (steg 1) och vid beräkningarna av grundvattenbildning i olika jordar (steg 2). På grund av ett inbördes samband mellan parametern fältkapacitet och den viktigaste parametern för potentiell avdunstning gick det inte att optimera fram markklassspecifika värden för parametern fältkapacitet. Vi kunde dock visa att för rimliga värden på avdunstningsparametern gick det att kalibrera fram markklassspecifika värden på parametern fältkapacitet, vilka bedömdes som rimliga för respektive markklass (70 mm för "grov jord", 244 mm för "morän" och 366 mm för "fin jord").

Den beräknade grundvattenbildningen var störst i grov jord, med värden över 600 mm/år i sydvästra Götaland. Den minskade med ökande värde på parametern fältkapacitet, ned till under 150 mm/år i fin jord i Mälardalen och på Östgötaslätten. (Fjällområden ingår inte i beräkningarna.) I Svealand och Götaland var den beräknade årliga grundvattenbildningen i grov jord omkring 70 mm större än i morän. Den grundvattenbildning som statistiskt sett underskreds ett år av 10 var ca 75 mm lägre än flerårsmedelvärdet, för både grov jord och fin jord.

Innehållsförteckning

Inledning.....	1
Bakgrund	1
Metod	2
Grundvattenbildningsmodell	3
Använda data.....	4
Vattenföring	4
Potentiell avdunstning	5
Vattendelare	7
Jordarter.....	7
Markanvändning.....	8
Kalibrering	8
Potentiell avdunstning	8
Fältkapacitet	9
Resultat.....	10
Kalibreringar	10
Potentiell avdunstning	10
Grundvattenbildning - avrinning.....	13
Beräkning av grundvattenbildningen i Sverige	16
Diskussion	16
Slutsatser och framtidsperspektiv.....	19
Referenser.....	19
Använda data.....	20
Appendix	21

Inledning

Grundvattenbildningens storlek är en nyckelfråga när det gäller hållbart utnyttjande av grundvattenresurserna. Ett uttag som på lång sikt är större än nybildningen av grundvatten till grundvattenmagasinet medför en långsiktig sänkning av grundvattennivån. Förutom minskade möjligheter till framtida grundvattenuttag kan sänkningen medföra marksättningar och kvalitetsproblem, bl.a. saltvatteninträngning i kustnära områden. Riksdagen har beslutat om miljökvalitetsmålet ”Grundvatten av god kvalitet” som bland annat formuleras som att ”förbrukning eller annan mänsklig påverkan sänker inte grundvattennivån så att tillgång eller kvalitet äventyras” (SOU, 2000).

I Ramdirektivet för vatten fastläs att grundvattenförekomster ska kartläggas och karakteriseras med avseende på bland annat påfyllnadshastighet (nybildning). För att kunna göra detta krävs en metod för bestämning av grundvattenbildningens storlek i skilda typer av magasin på skilda håll i Sverige. Då detta ska göras för ett stort antal grundvattenförekomster bör bestämningen i första hand kunna göras med hjälp av befintliga data vad gäller geologi, topografi och klimat och markanvändning.

Syftet med denna rapport är att ta fram översiktliga värden över grundvattenbildningens storlek i olika jordarter på skilda håll i Sverige. Detta görs med hjälp av vattenbalansberäkningar för rotzonen. Härvid utnyttjas, i något modifierade former, mark- och snömodulerna i den i Sverige mycket använda HBV-modellen (Bergström, 1976, Lindström m.fl., 1997). Som ett första steg undersöks hypotesen att man genom analys av data från ett stort antal avrinningsområden kan finna samband mellan jordart och modellparametrar. Det andra steget är att utnyttja dessa resultat för beräkning av grundvattenbildningen över hela landet. Resultaten presenteras bland annat i form av Sverigekartor.

Bakgrund

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.

Sjöar och vattendrag är normalt lågpunkter för grundvattenytan i omgivande landområde, och de tar emot ett utflöde av grundvatten. Vid grundvattenuttag ur akviferer som ansluter till vattendrag är det dock vanligt att grundvattennivån sänks så att det i stället sker påfyllnad av

grundvatten från ytvattnet. Sådan påfyllnad kan även ske där vattendrag från en tätare jordart når en mycket genomsläppligare jord, vars grundvattenyta naturligt kan ligga lägre än vattendragets nivå.

I denna rapport behandlas endast den grundvattenbildning som dominerar under svenska förhållanden, dvs den som sker genom perkolation av nederbördsvatten. De delar av landskapet där sådan grundvattenbildning sker utgör inströmningsområden, till skillnad från utströmningsområden i vilka grundvattnet strömmar från grundvattenzonen mot markytan eller vattendrag. Utströmningsområden utgör vanligen en mindre del av landskapet och de är normalt små i geologiska formationer med grovkornig jord, dvs i grundvattenmagasin med goda uttagsmöjligheter. I detta projekt beräknas den så kallade potentiella grundvattenbildningen (Grip och Rodhe 2003), vilket är den grundvattenbildning som sker på inströmningsområden, eller som skulle ske på ett utströmningsområde som genom grundvattennivåns avsänkning omvandlats till inströmningsområde.

Infiltrationskapaciteten hos svenska jordar, speciellt hos de grovkorniga jordar som kan innehålla utvinningsbart grundvatten, är normalt större än regnets eller snösmältningens intensitet. All nederbörd på inströmningsområden kan därför infiltrera och det vatten som bildar avrinning i vattendrag består till största delen av grundvatten som bringas att strömma ut när grundvattennivån stiger till följd av infiltrationen. Detta har visats i ett stort antal studier i humida klimat där man utnyttjat isotoper hos vattenmolekylens atomer som spårämnen (se t.ex. Rodhe 1987). Det färskare regn- eller smältvatten som i isotopstudierna observerats i vattendragen består sannolikt främst av så kallad mättad ytavrinning på utströmningsområden, där ju ingen infiltration kan ske, och av grundvatten med mycket kort uppehållstid i jord eller berg.

Om all nederbörd infiltrerar är grundvattenbildningen på lång sikt (flera år) lika med nederbörd minus avdunstning, dvs lika med den specifika avrinningen. Denna är väl känd ur direkta observationer (och avrinningsmodellering kalibrerat mot observationer) och den ger en första uppskattning av grundvattenbildningen, uttryckt t.ex. som mm/år. Den uppmätta specifika avrinningen kan dock sällan användas för att få fram uppgifter om grundvattenbildningens storlek i enskilda grundvattenmagasin, eftersom de avrinningsområden för vilka mätdata på avrinningen finns i de allra flesta fall består av flera olika jordarter och grundvattenmagasin. Områdets specifika avrinning blir ett medelvärde över grundvattenbildningen i de olika grundvattenmagasinen.

Ett flertal olika metoder har använts för beräkning av grundvattenbildning. De behandlar problemet i mycket varierande tids- och rumsskalor och de ställer olika krav på mätningar i fält (se t.ex. Scanlon m.fl. 2002 och Lerner 1997 för översikter). Exempel på metoder som tillämpats i Sverige är, utöver antagandet att grundvattenbildningen ges av den specifika avrinningen, vattenbalansberäkningar i rotzonen, perkolationsberäkningar med hjälp av Darcys lag, perkolationsberäkningar med hjälp av tillsatta eller naturliga spårämnen, beräkning av horisontell grundvattenbalans över lång tid inom ett område, analys av grundvattenytans nivåvariationer samt långtidsprovpumpning i brunnar med mycket väl definierade tillrinningsområden.

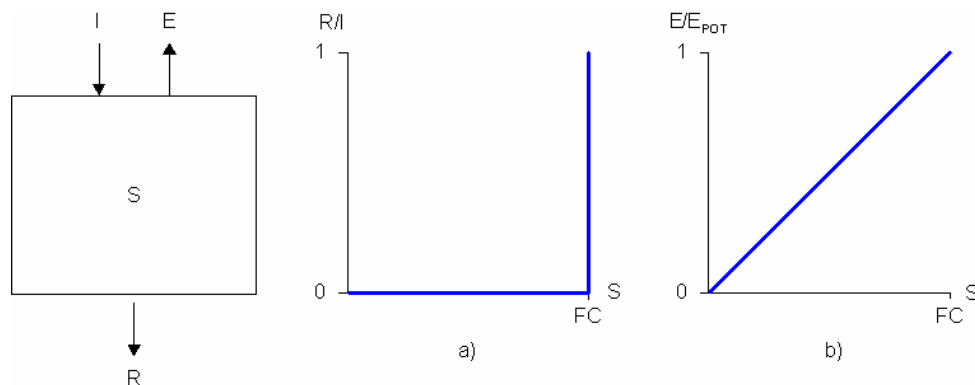
Metod

Parametervärden i en förenklad variant av HBV-modellens (Bergström, 1976, Lindström m.fl., 1997) markrutin optimerades genom att den beräknade grundvattenbildningen i ett stort

antal avrinningsområden i Sverige jämfördes med uppmätt avrinning. För att få fram parametervärden för olika jordarter och markanvändning betraktades avrinningen från ett område som summan av grundvattenbildningen i områdets olika markklasser. Grundvattenbildningen beräknades dygnsvis, men för att minska effekten av flödesimpulsernas fördröjning mellan grundvattenbildning och avrinning i vattendrag och den fortsatta fördröjningen i dräneringsnätet kalibrerades mot vattenföringens årsvärden. De framtagna parametervärdena användes sedan för att beräkna tidsserier av grundvattenbildningen över hela landet i de olika markklasserna.

Grundvattenbildningsmodell

En grundläggande tanke i modelleringsarbetet har varit att ha en enkel modell med så få parametrar att kalibrera som möjligt. Liksom i HBV-modellen betraktades rotzonen som en tvättsvamp till vilken allt regn eller smältvatten infiltrerar, Figur 1.



Figur 1. Grundvattenbildningsmodellens markvattenrutin. I = infiltrerat regn eller snösmältning, E = avdunstning, S = markvattenmagasin, R = grundvattenbildning (perkolation). Diagrammen anger perkolationens andel av infiltrationen (diagram a) respektive avdunstningens andel av den potentiella avdunstningen, E_{pot} (diagram b), bägge som funktion av beräknat markvatteninnehåll i rotzonen.

Snölagring och snösmältning beräknas på samma sätt som i HBV-modellen. Vid lufttemperatur under en tröskeltemperatur lagras nederbörden som snö. Vid lufttemperatur över en tröskeltemperatur beräknas smältningen med hjälp av en graddagsfaktor, dvs smältningen antas vara proportionell mot antal grader över en tröskeltemperatur.

$$M = C_m (T - T_m) \quad (1)$$

M = snösmältning

C_m = graddagsfaktor för smältning

T = lufttemperatur

T_m = tröskeltemperatur för smältning

Utflödet ur rotzonen sker genom avdunstning och perkolation. Avdunstningen är lika med den potentiella avdunstningen, reducerad med en faktor som beror av jordens vatteninnehåll.

$$E = E_{pot} \frac{S}{F_c} \quad (2)$$

E = avdunstning

E_{pot} = potentiell avdunstning
 S = rotzonens markvatteninnehåll
 F_c = fältkapacitet

Grundvattenbildning (perkolation) sker endast då det beräknade vatteninnehållet överskrider ett visst värde, parametern fältkapacitet. 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.

$$\begin{aligned} R &= 0 & \text{om } S \leq F_c \\ R &= I & \text{om } S > F_c \end{aligned} \quad (3)$$

R = grundvattenbildning (perkolation)
 I = infiltration

En skillnad mot HBV-modellens markrutin är att "kranen" här är antingen helt öppen eller helt stängd, under det att den i HBV-modellen öppnas och stängs gradvis. Denna den beräknade markvattenhaltens gradvisa reglering av perkolationen kan ses som ett försök att i HBV-modellen efterlikna perkolationens ytmässiga variation inom ett avrinningsområde, bland annat beroende på variation i jordarter. Vid beräkning av grundvattenbildning är det å andra sidan just bidragen från de olika jordarterna som är av intresse, varför vi valde att låta "kranen" vara antingen helt öppen eller helt stängd.

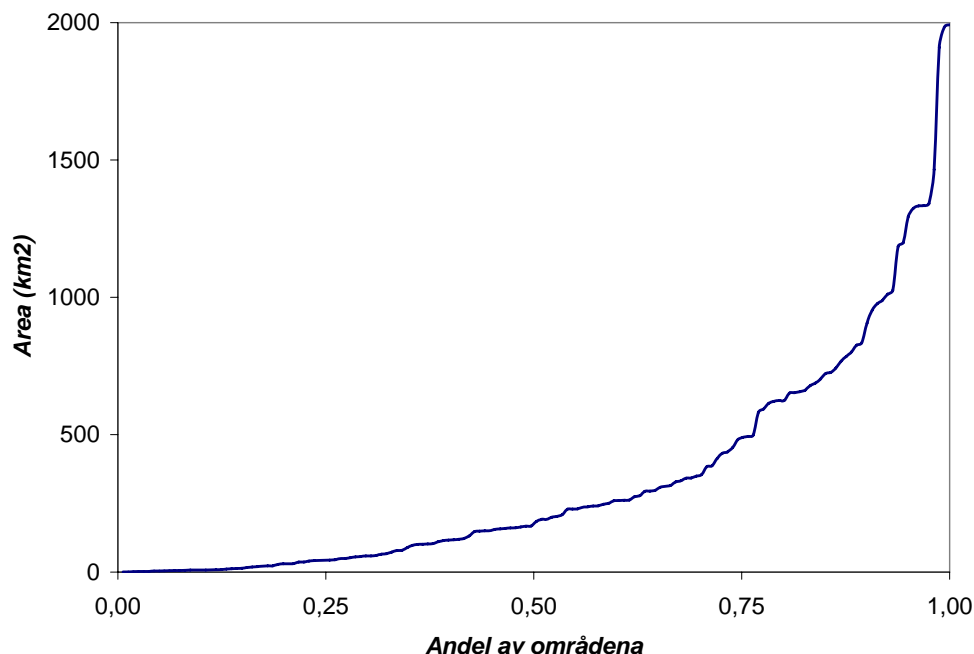
Använda data

Vattenföring

Vid kalibreringen användes vattenföringsdata från så många lämpliga stationer som möjligt ur SMHIs databas 1962-2003. Utgångspunkten var att stationer med areor mindre än 2000 km² och minst 5 års data var användbara. Av dessa 267 stationer återstod efter reduktion 161 stycken som bedömdes lämpliga att använda vid kalibreringen. Stationer som togs bort var:

- Vattendrag där vattenföringen i betydande grad är påverkad av reglering
- Områden med förekomst av fjäll
- Vissa stationer på Gotland

Reglerade vattendrag togs bort för att eliminera risken att regleringen påverkar den uppmätta vattenföringens årsvärden, mot vilka kalibreringen gjordes. Områden som innehåller fjäll togs bort främst därför att nederbördsdata är osäkra i fjällområden och dess närhet, på grund av problem med mätfel och representativitet. Två gotländska vattendrag i karstområden togs bort därför att vattendelarna där bedömdes som osäkra.



Figur 2. Kumulativ frekvensfördelning av arean hos de 161 avrinningsområden som användes vid kalibreringen. Den vertikala axeln anger area. Den horisontella axeln anger hur stor andel av områdena som har motsvarande eller mindre area.

Arean hos de avrinningsområden som användes vid kalibreringen varierar mellan 0,8 och 1992 km², med ett medianvärde på 184 km² (Figur 2). Sydsverige är kraftigt överrepresenterat beroende på det svenska vattenföringsnätets utformning (Figur 3). För att få stor variation i områdenas jordartsfördelning bedömde vi det dock som värdefullt att ha med alla lämpliga områden, även om det ger en överrepresentation åt södra delen av landet. Vissa avrinningsområden innefattar delområden med egna vattenföringsstationer som också används vid kalibreringen. För att få många områden valde vi att ha med även sådana "inbäddade" stationer. Eftersom alla områden är mindre än 2000 km² ingår förhållandevis få inbäddade områden.

Nederbörd och temperatur

Dagliga data över nederbörd och temperatur hämtades ur SMHIs klimatdatabas för tillämpning av hydrologiska modeller, kallad PTHBV. Databasen innehåller värden för perioden 1961 - 2003 som 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. SMHIs ordinarie system (HBV-IN) användes för att vikta dessa data till respektive delavrinningsområde. Detta gjordes dels för de 161 avrinningsområden som användes vid kalibreringen, dels för beräkning av grundvattenbildningen över landet genom modellberäkningar i 1001 avrinningsområden.

Potentiell avdunstning

För att kunna tillämpa grundvattenbildningsmodellen yttäckande över hela landet krävs yttäckande värden av den potentiella avdunstningen. Eriksson (1981) redovisar månadsmedelvärden (flerårsmedelvärden) av potentiell avdunstning enligt Penmans formel

(Penman, 1948) för perioden 1962-1978 för 152 svenska klimatstationer. För att få mer yttäckande värden, och för att utnyttja information om den potentiella avdunstningens variation mellan olika år, valde vi att ta fram ett empiriskt samband mellan lufttemperatur och beräknad potentiell avdunstning enligt Penman. Med ett sådant samband kunde vi utnyttja yttäckande data över lufttemperaturen och dess höjdberoende för att få motsvarande värden av den potentiella avdunstningen.



Figur 3. Vattenföringsstationer som använts vid kalibreringen (blå trianglar) och deras avrinningsområden (rödgula ytor).

Två datauppsättningar över potentiell avdunstning för utnyttjades dessa kalibreringar. Den ena utgjordes av två tidsserier med dagsvärden av lufttemperatur och beräknad potentiell avdunstning enligt Penman från Ultuna klimatstation 1988 -1999 (SLU, 2006 a) och Svartbergets klimatstation i Vindelns försökspark 1986 - 1995 (SLU, 2006 b). Den andra bestod av dygnsvärden av lufttemperatur (SMHI, 2006) och månadsmedelvärden (flerårsmedelvärden) från 19 av de klimatstationer för vilka Eriksson (1981) redovisar potentiell avdunstning enligt Penman. De 19 stationerna valdes så att de någorlunda väl representerade Sveriges yta utom fjälltrakterna. Vid val mellan näraliggande stationer prioriterades stationer för vilka vindhastigheten uppmätts med vindmätare framför sådana där vindhastigheten uppskattats av observatören. En kontroll av värdena från Eriksson (1981) gjordes för vissa av stationerna genom en jämförelse med motsvarande data för perioden 1930-1960 framtagna av Wallén (1966). Överensstämmelsen var god för de flesta stationer, men för vissa stationer i fjälltrakterna är Erikssons värde betydligt högre. Vi har inte analyserat orsaken till denna skillnad.

Den potentiella avdunstningen, E_{pot} , antogs proportionell mot lufttemperaturen (dygnsmedeltemperaturen) minus en referenstemperatur ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vid lufttemperatur under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ antogs den potentiella avdunstningen vara lika med 0. Proportionalitetsfaktorn $B(t)$ antogs variera sinusformat under året med högst värden sommartid. Eftersom luften kan förväntas vara torrare, och globalstrålningen större, ett visst antal dagar före midsommar än vid samma antal dagar efter midsommar, bör en viss lufttemperatur ge större potentiell avdunstning på våren än på hösten. För att åstadkomma detta i modellen infördes en fasförskjutning, Ψ . Ett negativt värde på denna tidigarelägger proportionalitetsfaktorns maximum motsvarande tid från sommarens halvårsskifte.

$$E_{pot} = B(t) \cdot T \quad \text{för } T > 0\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$$E_{pot} = 0 \quad \text{för } T \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$B(t) = (1 + A \cdot \sin(2\pi \frac{t + \Psi}{365} - \frac{\pi}{2})) \cdot C_E$$

t = dagnummer på året

A = amplitud

Ψ = fasförskjutning (dagar)

C_E = avdunstningsparameter ($\text{mm d}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Vattendelare

Avgränsning av avrinningsområdena gjordes med hjälp av SMHIs databas över vattendelare. Dessa är till största delen framtagna manuellt ur topografiska kartan, skala 1:50 000, och är standard inom en stor del av SMHIs hydrologiska arbete.

Jordarter

Jordartsfördelningen inom avrinningsområdena har beräknats med hjälp av SGUs digitala data. Underlaget är SGUs jordartskartor i skala 1:50 000, 1:100 000 eller 1:250 000. För stora delar av landet, speciellt de västra delarna av Nord- och Mellansverige, är underlaget jordartskartor i skala 1:1 000 000. Denna skala ger förhållandevis onoggrann

jordartsfördelning. Ett problem är att rullstensåsar i sådana kartor kan ha ritats bredare än de är för att synas tydligt i jordartskartan, vilket gör att andelen isälvssediment kan vara systematiskt för stor.

För de inledande kalibreringsförsöken användes jordartsklasserna *grov jord*, *fin jord*, *morän*, *kalt berg* och *torv*, se Tabell 1 där dessa klasser definieras.

Markanvändning

Data över markanvändning erhöles från översiktskartan i skala 1:250 000 från Lantmäteriet. För kalibreringen användes klasserna *skog*, *öppen mark* och *sjö*, se Tabell 1. Kombinerade klasser av jordarter och markanvändning i skapades i GIS. Exempelvis skog på grova jordar särskildes från skog på fina jordar, etc.

Tabell 1 Inledningsvis använda jordarts- och markanvändningsklasser. Med markklass menas kombination av jordart och markanvändning.

<i>Jordartsklass</i>	<i>Jordarter i digitala data från SGU</i>
Grov jord	"Grovm, sand, grus" och "Isälvssediment"
Morän	"Morän"
Fin jord	"Lera, finmo" och "Lerig morän, moränlera"
Torv	"Torv"
Kalt berg	"Kalt berg, tunt eller ej sammanhängande jordtäckte på berg"

<i>Markanvändningsklass</i>
Skog
Öppen mark
Sjö

Kalibrering

Som tidigare framhållits var idén med projektet är att ta fram parametervärden för olika markklasser (jordart + markanvändning) för att kunna använda parametervärdena vid beräkning av grundvattenbildningen över hela landet för de olika markklasserna. Vid ansättning av parametervärden som inte är direkt relaterade till jordarter utnyttjades erfarenheter från HBV-modellens användning för avrinningsmodellering. Vidare eftersträvades att ha en uppsättning parametervärden som kunde användas för hela landet, se Tabell 2.

Potentiell avdunstning

Parametrarna för potentiell avdunstning enligt ekv (4) kalibrerades manuellt för att en rimligt god anpassning skulle uppnås mellan de två beräkningsmetoderna. Dessa kalibreringar gjordes separat, före kalibreringen av fältkapacitet för respektive jordart.

För Ultuna och Svartberget, för vilka dygnsvärden av potentiell avdunstning enligt Penman fanns tillgängliga, jämfördes dygnsvärdenas årstidsvariation under enskilda år visuellt utgående från grafer över glidande 10-dygnsmedelvärden. Dessutom jämfördes årssummor av potentiella avdunstningen.

Tabell 2. Parametrar och parametervärden.

Parameter		Ansatt värde	Enhet	Anmärkning
C_E	Avdunstningsparameter		$\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	kalibreras mot E_{Penman}
$C_{\text{sjö}}$	Avdunstningsparameter för sjö	$1,1 \cdot C_{\text{land}}$	$\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
A	Amplitud hos sinusfunktion för $B(t)$		-	kalibreras mot E_{Penman}
ψ	Fasförskjutning hos $B(t)$		d	kalibreras mot E_{Penman}
T_m	Tröskeltemperatur för snöfall/snösmältning	0	$^\circ\text{C}$	
$C_{g,\text{skog}}$	Graddagsfaktor för skog	2,0	$\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	vid inledande kalibreringar
$C_{g,\text{öppen}}$	Graddagsfaktor för öppen mark	3,5	$\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	- " -
$C_{g,\text{land}}$	Graddagsfaktor för alla landområden	2,5	$\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	vid slutgiltiga kalibreringar och beräkning över Sverige
F_c	Fältkapacitet för respektive jordart		mm	kalibreras mot avrinning

För de 19 klimatstationerna med enbart månadsmedelvärden beräknades den potentiella avdunstningen dygnsvis enligt ekv(4). Månadsmedelvärden (flerårsmedelvärden) jämfördes visuellt med Erikssons värden enligt Penman och parametrarna justerades så att såväl totalsumman som summan av de enskilda årens absoluta avvikelser bedömdes som tillräckligt små.

Fältkapacitet

Hypotesen i detta projekt var att ett värde på modellparametern fältkapacitet skulle kunna optimeras fram för respektive jordart. Parametervärdena optimerades med Brent-rutinen (Press m.fl., 1992) för en parameter i taget, i en slinga över alla parametervärdena till dess att stabila parametervärden erhöles. Anpassning gjordes mellan enskilda årsvärden av beräknad grundvattenbildning och motsvarande årsvärden av den observerade specifika avrinningen.

Vattenföringen Q vid en mätstation beräknades som summan av bidragen från dess olika markklasser

$$Q = \sum Q_i = \sum a_i q_i \quad (5)$$

markklass $i = 1 \dots n$

area a

specifik avrinning q

Vid kalibreringen maximerades Nash och Suteliffes (1970) effektivitetsvärde R_{eff} på tidsserierna, dvs vi maximerade $R_{eff} = f(p_{1,i}, p_{2,i}, \dots)$ där p_1, p_2, \dots är olika modellparametrar vars värde antas bero på markklass, dvs jordart och markanvändning. Gemensam kalibrering gjordes med tidsserierna från alla 161 avrinningsområden.

Vid kalibreringen undersöktes tre olika sätt att beräkna R_{eff} :

- Medelvärde av alla områdens R_{eff} beräknade på enskilda årsvärden (R_1)
- R_{eff} för lång serie av årsvärden med alla områden hoplagda (R_2)
- R_{eff} för långtidsmedelvärdet av simulerad grundvattenbildning i varje område (R_3)

Med R_1 ges alla områden lika vikt oberoende av tidsseriernas längd, med R_2 ges områden med långa tidsserier större vikt än de med korta och med R_3 används bara ett värde per område i optimeringen. R_1 och R_2 gav likvärdiga resultat under det att R_3 , som väntat, var ett trubbigt mått som gav lång optimeringstid och osäker anpassning. I de fortsatta kalibreringarna användes R_1 som mått på anpassningen. Vid kalibreringen optimeras en parameter i taget, varefter värdet på den optimerade parametern hålls konstant. Försök visade att den ordning i vilken parametrarna kalibrerades inte hade någon avgörande betydelse för resultatet.

En av förutsättningarna för att jordartsspecifika parametervärden skulle kunna erhållas var att jordartsfördelningen inom de studerade områdena skilde sig, vilket den naturligtvis också gjorde. En annan förutsättning för att effekten av en viss jordart ska vara märkbar på grundvattenbildningen i ett område, och därmed enligt modellen också på parametervärdet, är att jordartens areaandel är tillräckligt stor i en betydande andel av de områden som kalibreras. En jordart för vilken areaandelen inte överskrider några få hundradelar i något område kommer inte att ha en märkbar påverkan på grundvattenbildningen. Eftersom de flesta områden domineras av morän blev t.ex. andelen områden med hög andel *grov jord* förhållandevis liten när alla 161 områden utnyttjades. I ett försök att förstärka signalen från de olika jordarterna i den beräknade grundvattenbildningen gjordes därför även kalibreringar på grupper av områden till vilka områden med särskilt höga andelar av jordartsklasserna *grov jord* respektive *fin jord* hade valts ut. Nackdelen med sådana urval var att antalet områden som ingick i kalibreringen minskade och därmed antal värden som ingick i optimeringen.

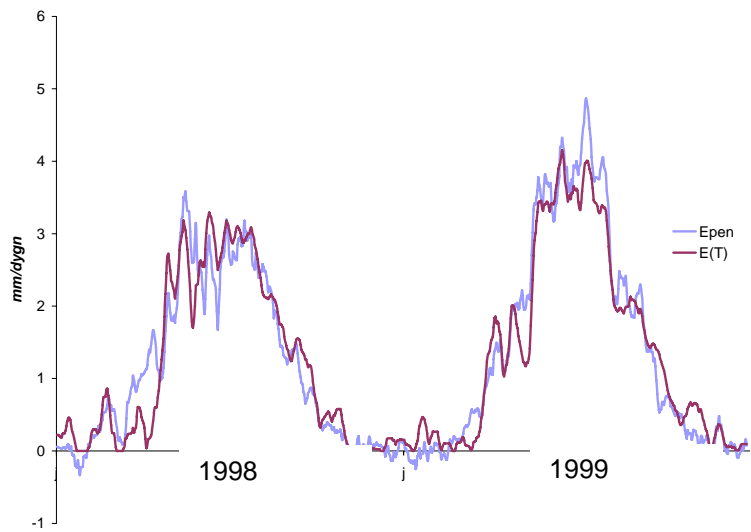
Resultat

Kalibreringar

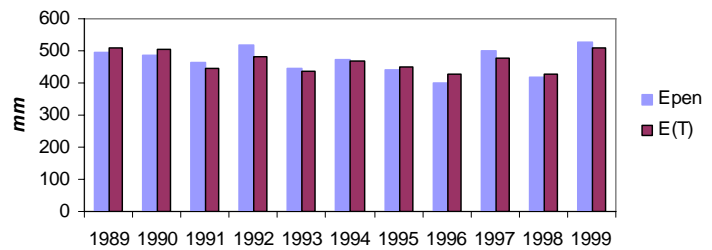
Potentiell avdunstning

För de två undersökta stationerna med dygnsvärden, Ultuna och Svartberget, kunde variationen av den potentiella avdunstningen enligt Penman under enskilda år beskrivas förhållandevis väl av ekv (4) (Figur 4 a,b och 5 a,b). Anpassningen var särskilt god för Ultuna, där även överensstämmelse mellan årsvärden var acceptabel. För Svartberget gick det däremot mindre bra att efterlikna årsvärdenas variation. Parametern C_E skiljde sig avsevärt mellan de två stationerna, se Tabell 3.

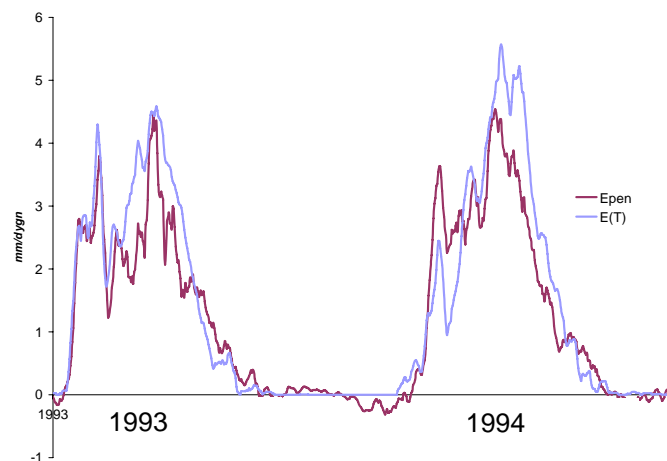
Figur 4 a. Potentiell avdunstning enligt Penmans formel (E_{pen}) och beräknad ur lufttemperatur ($E(T)$) för Ultuna 1998-1999. Glidande 10-dygnsmedelvärden.



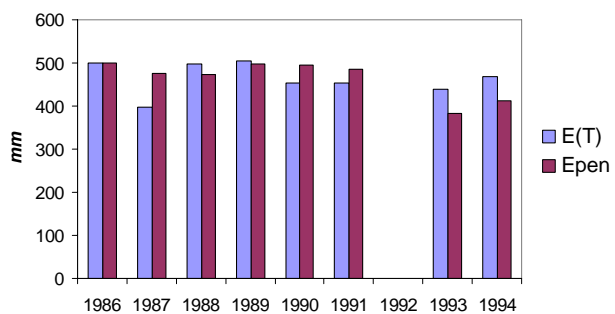
Figur 4 b. Potentiell avdunstning beräknad enligt Penmans formel (E_{pen}) och beräknad ur lufttemperatur ($E(T)$) för Ultuna 1989-1999. Årsmedelvärden.



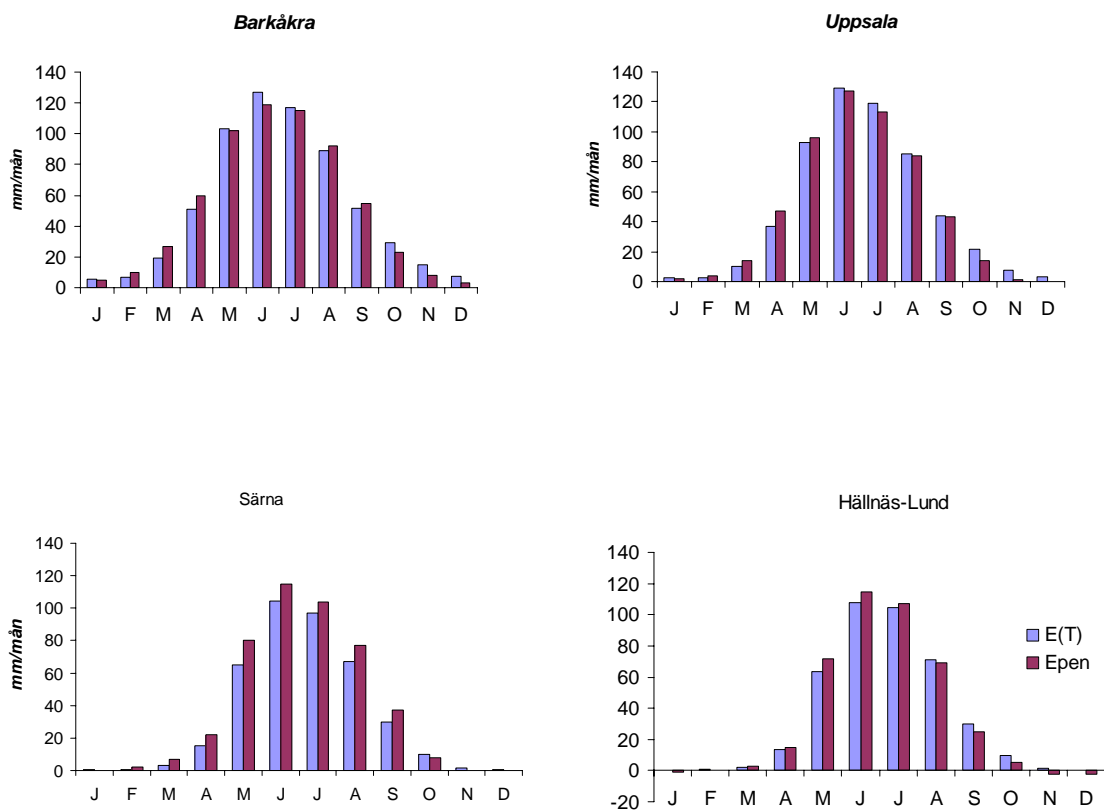
Figur 5 a. Potentiell avdunstning enligt Penmans formel (E_{pen}) och beräknad ur lufttemperatur ($E(T)$) för Svartberget 1993-1994. Glidande 10-dygnsmedelvärden



Figur 5 b. Potentiell avdunstning beräknad enligt Penmans formel (E_{pen}) och beräknad ur lufttemperatur ($E(T)$) för Svartberget 1986-1994. Årsmedelvärden. (Data från 1992 saknas.)



För månadsmedelvärdena enligt Eriksson (1984) gick det att ta fram parametervärden som gav en acceptabel likhet i årstidsvariationerna och rimlig skillnad mellan medelmånadssummor enligt ekv (4) och enligt Erikssons värden, se exempel på medelårstidsvariation i Figur 6 och sammanställning av parametervärden och kalibreringsresultat i Tabell 3. Med samma värden på parametrarna A och Ψ var variationen hos C_E måttlig. Det geografiska mönster som gick att urskilja hos C_E , med $A = 0,5$ och $\Psi = -45$ dygn, var att värdet var förhållandevis enhetligt, $0,21 \pm 0,01 \text{ mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ på de flesta stationerna i Götaland (utom Visby), Östra Svealand och Norrlands kustregion. I Visby, fjälltrakterna och de västra delarna av Svealand och Norrland var värdet betydligt högre och variationen var stor, med värden mellan $0,24$ och $0,31 \text{ mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.



Figur 6. Exempel på potentiell avdunstning beräknad enligt Penmans formel (E_{pen}) (data från Eriksson 1981) och beräknad ur lufttemperatur ($E(T)$). Månadsmedelvärden (flerårsmedelvärden) 1961-1978. Vid alla dessa beräkningar av $E(T)$ har parametervärdena $C_E=0,21$, $A=0,5$ och $\Psi=45$ dygn använts. (Barkåkra ligger i Skåne, Uppsala i Uppland, Särna i Dalarna och Hällnäs-Lund i Västerbotten.)

Eftersom kalibrering inte gjordes för vattenföringsstationer med fjällområden togs större hänsyn till C_E -värden från södra och östra delarna av landet.

Tabell 3. Anpassade parametervärden för potentiell avdunstning.

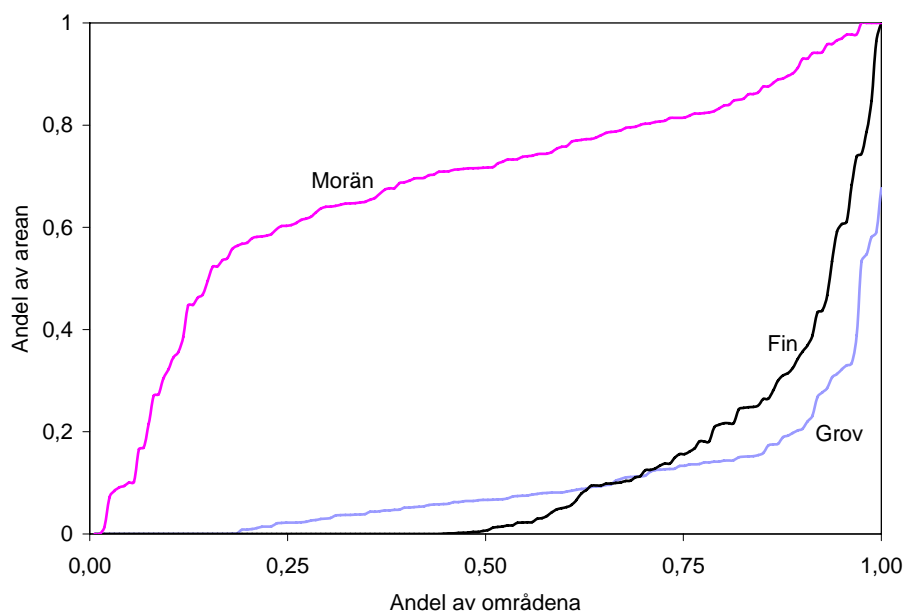
Station	Data	C_E ($\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	A (-)	Ψ (dygn)
Ultuna	Dygn	0,16	0,5	45
Svartberget	Dygn	0,21	0,6	45
19 stationer ur Eriksson (1981)	Medelmånader	0,19-0,31 median = 0,22	0,56	45

Grundvattenbildning - avrinning

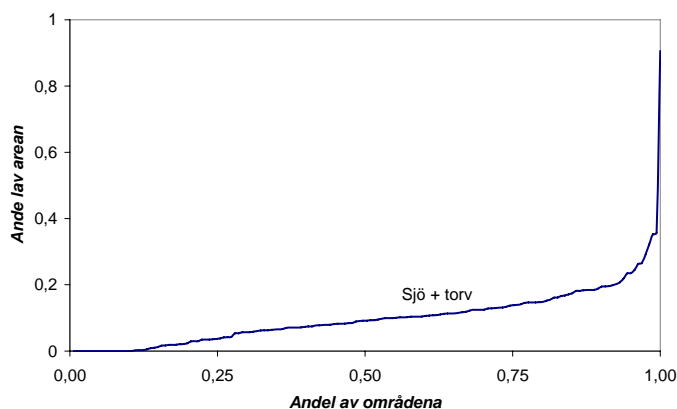
Inledande kalibreringsförsök för parametern fältkapacitet gjordes med de fem jordartsklasserna (*grov jord*, *fin jord*, *morän*, *kalt berg* och *torv*) och de tre markanvändningsklasserna (*skog*, *öppen mark* och *sjö*), vilket gav 11 markklasser (två per jordart samt sjö). Det visade sig svårt att få stabila parametervärden varför ett stort antal olika kalibreringsstrategier provades. En sådan var att använda enbart områden med de största andelarna *grov jord* respektive *fin jord* vid kalibreringen, men detta förbättrade inte resultatet. En annan var att samtidigt kalibrera fältkapacitet och avdunstningsparametrar, men även den strategin var utan framgång, eftersom de optimerade värdena på avdunstningen och fältkapaciteten berodde så starkt av varandra. Ytterligare en strategi var att optimera parametervärden inom mindre regioner inom vilka klimatet antogs vara mer homogent. Tanken var att samma mönster skulle erhållas i flera olika regioner, men så blev inte alltid fallet.

Efter de inledande försöken minskades antalet markklasser till fyra, *grov jord*, *fin jord*, *morän+kalt berg* (i fortsättningen kallad *morän*) och *sjö+torv* vilket innebar att uppdelningen i skog/öppen mark övergavs. Dessa fyra klasser användes vid alla fortsatta beräkningar. I Figur 7 och 8 visas areafördelningen av klasserna i de 161 avrinningsområden som användes vid kalibreringen.

Figur 7. Kumulativ frekvensfördelning av andelen area för de olika markklasserna i de 161 avrinningsområden som användes vid kalibreringen. Den vertikala axeln anger andel area i respektive markklass. Den horisontella axeln anger hur stor andel av områdena som har motsvarande eller mindre andel av den markklassen.



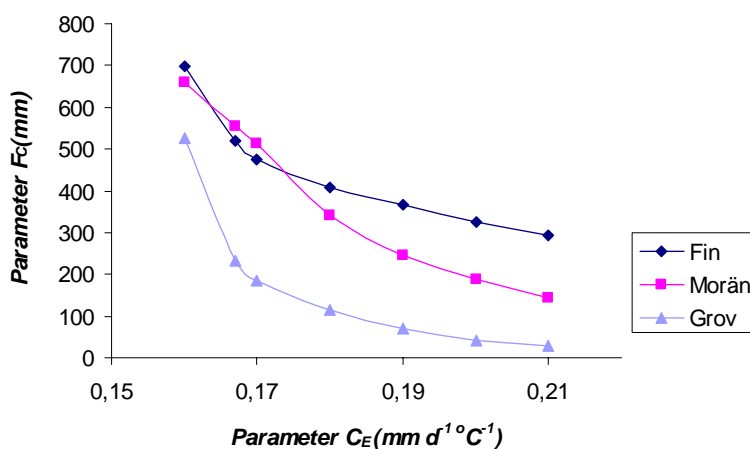
Figur 8. Kumulativ frekvensfördelning av andel sjö+torv i de 161 avrinningsområden som användes vid kalibreringen. I ett område, Hulubäcken i Komosse, är andelen torv extremt stor, vilke ger ett hopp i diagrammet från 0,36 till 0,91.



Vid den slutgiltiga kalibreringen gjordes således ingen skillnad mellan skog och öppen mark. Den enda parameter som gavs olika värden för dessa markanvändningsklasser var snösmältningsparametern graddagsfaktor för smältning, C_m . I stället för HBV-modellens standardvärden $2,0 \text{ mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ för skog och $3,5$ för öppen mark gavs den nu värdet $2,5 \text{ mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ för alla landområden (efter viktning utgående från områdenas medianandelar skog/öppen mark). Värdet på denna parameter har liten inverkan på avrinningens årssumma.

Vidare behandlades områden med jordarten torv som sjö. I denna markklass finns ingen lagring som snö och ingen markvattenzon i modellen. All nederbörd går direkt till avrinning och avdunstningen antas ständigt vara potentiell, med avdunstningsparametern $C_E = 1,1 \cdot C_{E\text{land}}$.

Kalibreringen gav olika värden på parametern fältkapacitet för landområdenas tre markklasser. De värden som erhöles visade sig vara mycket känsliga för valet av avdunstningsparametrar, se Figur 9. En ökning av C_E medför att den potentiella avdunstningen ökar och därmed ökar den beräknade avdunstningen för en viss beräknad markvattenhalt (ekv 4). För att vattenbalansen ska gå ihop i modellen minskar optimeringen F_c så att markvattenhalten minskar förhållandevis snabbt. Därmed minskar även den beräknade avdunstningens andel av den potentiella avdunstningen förhållandevis snabbt. Ett litet F_c kan sägas skydda rotzonen mot avdunstning, eftersom jorden snabbt torkar ut och det finns lite vatten kvar för avdunstning.



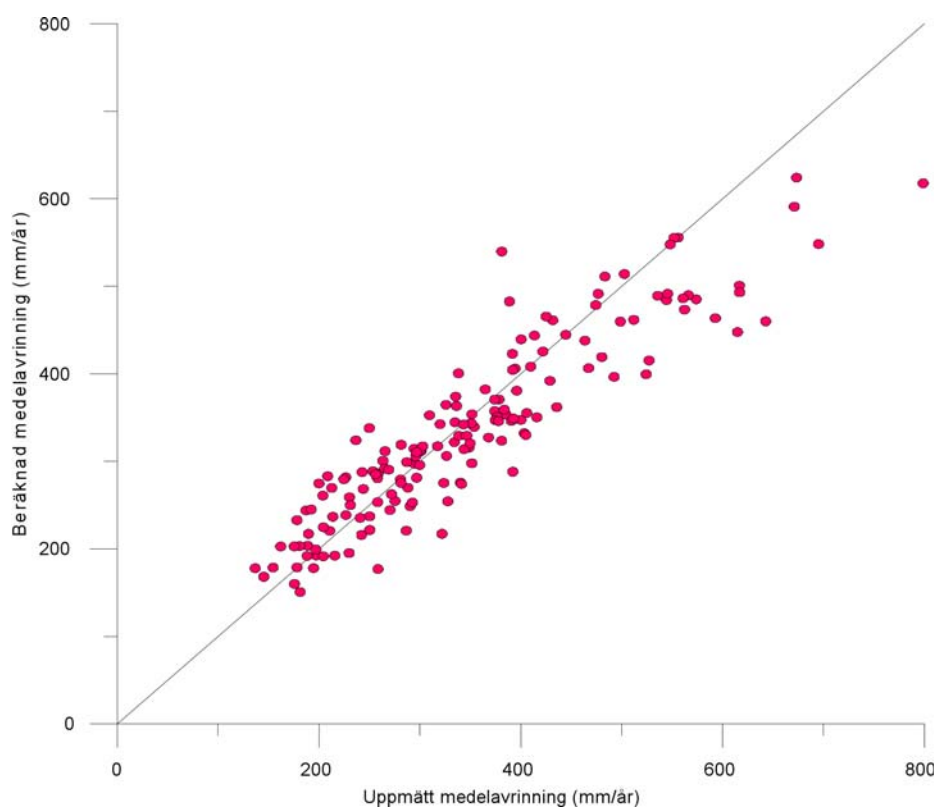
Figur 9. Framkalibrerade värden på markparametern F_c för olika markklasser, som funktion av ansatta värden på avdunstningsparametern C_E .

Utgående från de manuella anpassningarna av avdunstningsparametrar (Tabell 3), de framkalibrerade värdena på fältkapacitet för olika värden på C_E (Figur 9) och även kravet att ha rimliga värden på fältkapacitet för de olika markklasserna valdes värden på avdunstningsparametrarna enligt Tabell 4. Motsvarande framkalibrerade värden på fältkapacitet anges i tabellen. Vid beräkningen av grundvattenbildningen i Sverige användes denna uppsättning parametervärden.

Tabell 4. Parametervärden som använts vid beräkning av grundvattenbildningen i Sverige.

Parameter	Värde
C_E	$0,19 \text{ mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
A	0,5
Ψ	45 dygn
F_c grov jord	70 mm
F_c morän	244 mm
F_c fin jord	366 mm

Vid denna parameteruppsättning blev det genomsnittliga effektivitetsvärdet $R_{\text{eff}} = 0,41$ (kallat R_1 ovan) mellan beräknad grundvattenbildning och observerad avrinning. Figur 10 visar överensstämmelsen mellan beräknade och observerade flerårsmedelvärden. Medelvärdet av absolutfelen i de enskilda avrinningsområdena blev mindre än 12 %, vilket visar att medelavrinningens variation i rummet förklaras väl av den använda modellen. Till största delen är detta dock en effekt av att klimatets variation beskrivs väl av de använda nederbörds- och temperaturdata.



Figur 10. Jämförelse mellan beräknad medelavrinning (dvs antagen grundvattenbildning) och uppmätt medelavrinning för de 161 avrinningsområden som använts vid kalibreringen.

Beräkning av grundvattenbildningen i Sverige

Grundvattenbildningsmodellen användes för att ur nederbörd och lufttemperatur göra landsomfattande beräkningar av grundvattenbildningen i de tre markklasserna. Beräkningarna gjordes för 1001 avrinningsområden som tillsammans täcker nästan hela landets yta utom fjällen. Den finska delen av Torne älvs avrinningsområde ingår, liksom några mindre ytor i Norge. Vid beräkningarna användes parametervärden enligt Tabell 2 och 4.

Resultatet presenteras i form av kartor i Appendix, som för de tre markklasserna visar flerårsmedelvärden (Figur A1), variationskoefficient för enskilda årsvärden (Figur A2) samt de årsvärden som statistiskt sett underskreds ett år av 10, här kallad 10-årstorkan (Figur A3).

Den beräknade grundvattenbildningen följer den specifika avrinningens variation över landet, med lägst värden i de sydöstra delarna och högst värden längs Västkusten och mot den norska gränsen (Figur A1). Om fjällområden hade varit med i beräkningarna hade den största grundvattenbildningen erhållits där. Grundvattenbildningen var störst i grov jord, med värden över 600 mm/år i sydvästra Götaland. Med ökande värde på parametern F_c minskade den beräknade grundvattenbildningen, ned till under 150 mm/år i fin jord i Mälardalen och på Östgötaslätten (Figur A1).

I Figur A4 visas hur grundvattenbildningens flerårsmedelvärde i grov jord respektive fin jord avviker från grundvattenbildningen i morän. I Svealand och Götaland är den årliga grundvattenbildningen i grov jord omkring 70 mm högre än i moränen. Den negativa avvikelser för fin jord är mindre, med omkring 20 mm lägre årlig grundvattenbildning än i moränen. Eftersom morän dominerar i de flesta verkliga avrinningsområden ger dessa avvikelser en uppfattning om hur mycket värdena för grov jord respektive fin jord avviker från medelgrundvattenbildningen, dvs från medelavrinningen.

Liksom avrinningen har den beräknade grundvattenbildningen stora variationer mellan olika år. Ett mått på den relativa variationen mellan årsvärden ges av variationskoefficienten (=standardavvikelsen/medelvärde) som är 0,25-0,35 för grov jord i stora delar av landet (Figur A2). För finkornig jord är den större, med värden kring 0,35-0,45 över stora områden och över 0,55 i nordöstra Götaland. Förekomsten av relativt sett torra år är av speciellt intresse för grundvattenplanering. Områden med lägst medelgrundvattenbildning har, som väntat, lägst värden på 10-årstorkan (Figur A3). Skillnaden mellan 10-årstorkan i grov jord och fin jord är påfallande konstant över hela landet, omkring 75 mm/år.

Diskussion

Syftet med att ta fram kartorna över grundvattenbildningen i Sverige var att ge en översiktlig bild över grundvattenbildningens regionala variation och visa tänkbara skillnader mellan grundvattenbildningen i de olika markklasserna. Kartorna bör användas med försiktighet. De ska ses som ett led i en pågående modellutveckling för beräkning av grundvattenbildning.

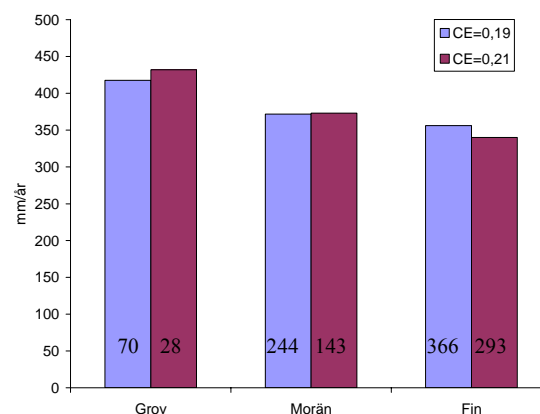
Grundvattenbildningen beräknades med en enkel vattenbalansmodell för rotzonen. Strategin var att utnyttja ett så stort datamaterial som möjligt och att använda en så enkel modell som möjligt, med få parametrar att kalibrera. Hypotesen var att man genom kalibrering av beräknad grundvattenbildning mot uppmätt avrinning i ett stort antal områden över landet skulle kunna finna jordartsspecifika värden på parametern fältkapacitet. Dessa värden skulle

sedan användas för att ur klimatdata beräkna grundvattenbildningen i olika jordarter över landet.

En underliggande förutsättning för angreppssättet är att all avrinning från de tre landklasserna sker via grundvatten. Ingen hänsyn tas till eventuell förekomst av ytavrinning i sådana områden. Däremot sker ytavrinning i områden med torv, vilka slagits samman med klassen sjö. I denna klass är modellens avdunstning alltid potentiell och det finns inget markvattenmagasin. Detta är utströmningsområden, där grundvattenytan når upp till markytan och nederbörden bildar så kallad mättad ytavrinning.

Inledande försök med 5 jordartsklasser och 3 markanvändningsklasser, vilket innebar 10 klasser för land plus klassen sjö, visade att det inte gick att få fram stabila parametervärden. Klasserna slogs så småningom samman till fyra: *grov jord*, *fin jord*, *morän+kalt berg (kallad morän)* och *sjö+torv*. Med dessa klasser gick det att kalibrera fram stabilare värden på parametern fältkapacitet som skilde sig för de tre landklasserna. Vår tolkning av detta är att de olika markklassernas bidrag till grundvattenbildningen skiljer sig så mycket att det på ett systematiskt sätt avspeglas i avrinningen från olika avrinningsområden. Grova jordar har liten lagringsförmåga för markvatten, vilket ger jämförelsevis liten avdunstning och stor grundvattenbildning.

Eftersom kalibreringen görs mot uppmätt avrinning strävar modellen att upprätthålla vattenbalansen vid kalibreringen. Detta förklarar det tidigare kommenterade sambandet mellan C_E och F_c , dvs att en ökning av C_E ger en minskning av F_c (Figur 9). Det innebär också att den beräknade grundvattenbildningen inte är så känslig för valet av C_E , eftersom en ändring av denna parameter kompenseras av en ändring i F_c . Känsligheten undersöktes när modellen i nästa steg användes för att beräkna grundvattenbildningen i olika jordar över hela Sverige. När C_E ökades från 0,19 till 0,21 $\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (med motsvarande framkalibrerade värden på fältkapacitet enligt Figur 9) var den relativa ändringen i medelgrundvattenbildningen i de olika markklasserna mindre än 5 % (Figur 11).



Figur 11. Medelvärde av beräknad grundvattenbildning i de olika markklasserna i 1001 avrinningsområden för olika värden på parametern C_E ($\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Siffrorna i staplarna anger motsvarande värde på F_c (mm) enligt Figur 9.

Observera att medelgrundvattenbildningen över landet för de olika markklasserna (Figur 11) har tagits fram för att belysa hur den beräknade grundvattenbildningen beror av parametrarna F_c och C_E . Siffrorna anger hur stor medelgrundvattenbildningen över landet skulle ha varit om hela landet bestod av var och en av dessa markklasser. Den verkliga jordartsfördelningen har

inte använts vid beräkningarna. De beräknade medelvärdena beror av hur nederbörd och lufttemperatur varierar över landet.

Eftersom det framkalibrerade värdet av F_c beror av C_E kan vi inte sägas ha fått fram värden på F_c för de olika markklasserna. Vi har däremot visat att för rimliga värden på C_E går det att kalibrera fram markklassspecifika värden på F_c . Vår metod var att för de fortsatta beräkningarna välja ett värde på C_E som ansluter till resultaten av kalibreringen av modellen för potentiell avdunstning (Tabell 3) och som samtidigt gav rimliga värden på F_c , tolkat som fältkapacitet (Tabell 4). Inom det intervall av C_E som undersöktes var F_c genomgående minst för grov jord, vilket stämmer kvalitativt med kornstorlekens inverkan på en jords vattenhållande förmåga. Vidare var F_c -värdet för morän mindre än för fin jord inom större delen av intervallet, men F_c -värdena för dessa två markklasser gick samman vid små värden på C_E och bytte även storleksrelation (Figur 9). Även om värdena på F_c var mycket känsliga för C_E var, enligt ovan, den beräknade grundvattenbildningen förhållandevis okänslig för valet av C_E vid de höga värden av C_E som användes.

Beräkningen av potentiell avdunstning har varit ett nyckelproblem vid modellutvecklingen. Med de enhetliga parametervärden vi använt för att beräkna denna ur lufttemperaturen avviker den potentiella avdunstningen på många platser betydligt från den som beräknats ur fullständiga klimatdata. Detta ger en osäkerhet i beräknad verklig avdunstning och därmed i beräknad grundvattenbildning. Som tidigare nämnts bör den beräknade grundvattenbildningen i morän i stort sett representera den specifika avrinningen, eftersom morän är den dominerande jordarten i stora delar av landet. Den beräknade årliga grundvattenbildningen i morän överensstämmer i stor sett med den specifika avrinningen enligt SNA (1995). Vid jämförelsen bör man notera att kartan i SNA bygger på data 1961-1990 under det att våra beräkningar är för perioden 1961-2003. Medelavrinningen för dessa perioder, beräknad för hela Sverige (inklusive fjällen), var dock mycket lika, 374 respektive 380 mm/år.

Skillnaden i grundvattenbildning mellan olika markklasser var större i södra Sverige än i norra (Figur A4), vilket avspeglar den större potentiella avdunstningen i söder. Ju större den potentiella avdunstningen är, desto större roll spelar jordens vattenhållande egenskaper för grundvattenbildningen. Till detta kommer effekten av olika stor nederbörd. Vid en viss potentiell avdunstning ökar betydelsen av jordens vattenhållande egenskaper för grundvattenbildningen när nederbörden minskar. Ju torrare klimatet är, desto större magasin krävs i rotzonen för att upprätthålla hög avdunstning mellan regnen. Skillnaden var därför störst i den sydöstra, torraste, delen av landet.

Att variationskoefficienten är störst i den finkornigaste jorden (Figur A2) är framför allt en effekt av att grundvattenbildningens medelvärde där är minst, vilket ger stor relativ variation för en viss absolut variation mellan årsvärdena. Standardavvikelsen är ungefär lika stor för de tre markklasserna, med medelvärden över landet på 99, 103 och 104 mm/år för grov jord, fin jord respektive morän.

Slutligen bör framhållas att kartorna visar den så kallade potentiella grundvattenbildningen, dvs den grundvattenbildning som skulle ha skett per ytenhet om den betraktade arean vore inströmningsområde. För den sammanlagda grundvattenbildningen i en akvifer i grov jord är skillnaden sannolikt liten mellan potentiell och verklig grundvattenbildning, eftersom utströmningsområdena normalt är små i sådana jordar. I finkorniga jordar kan utströmningsområdena dock utgöra en betydande andel av arean. Detta gäller särskilt under perioder med stor nederbörd eller snösmältning, dvs under perioder då grundvattenbildning sker. Vid

bedömning av den sammanlagda grundvattenbildningen till ett sådant grundvattenmagasin bör man ta hänsyn till att bara inströmningsområden bidrar.

Slutsatser och framtidsperspektiv

Vi har undersökt möjligheten att utnyttja sverigetäckande databaser över jordarter, markanvändning, vattendelare, avrinning, nederbörd och lufttemperatur för att med en enkel vattenbalansmodell beräkna grundvattenbildningens storlek i olika jordar. Resultatet stöder hypotesen att en jordartsspecifik parameter som styr grundvattenbildningen kan optimeras fram genom kalibrering av beräknad grundvattenbildning mot observerad avrinning.

De absolutvärden på grundvattenbildning som redovisas i denna rapport är förhållandevis osäkra, men skillnaderna mellan markklasserna bör ha något större tillförlitlighet. Vår bedömning är att en utveckling av modellen kan ge ökad kunskap om grundvattenbildningens storlek och dess samband med jordart. Följande steg föreslås

- utveckla en regional modell för potentiell avdunstning, där fler klimatvariabler, i första hand luftfuktighet, används vid beräkningarna
- kalibrera den beräknade grundvattenbildningen mot observerade grundvattennivåer
- undersök effekten av en mer gradvis reglering av modellens perkolation

Referenser

- Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping.
- Eriksson, B. (1981) Den "potentiella" evapotranspirationen i Sverige. SMHI Rapporter RMK Nr 28 och RHO Nr 27.
- Grip, H. & Rodhe, A. (2003) *Vattnets väg från regn till bäck*, Hallgren och Fallgren, Uppsala.
- Johansson, B. (2002) Estimation of areal precipitation for hydrological modelling in Sweden. Earth Sciences Centre, Department of Physical Geography, Göteborg University. Doctoral Thesis A76.
- Lerner, D. H. (1997) Groundwater recharge. In Saether, O. M. and de Caritat, P. (Eds): *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp 109-150.
- 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.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10(3), 282-290.
- Penman, H.L. (1948) Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 193, 120-145,

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P. (1992) Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press.

Rodhe, A. (1987) The origin of streamwater traced by oxygen-18. Uppsala Univ., Dept Phys. Geogr., Div. Hydrol., Report Series A 41, 290 pp, Appendix 73 pp. (Doctoral thesis)

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, *Hydrogeology Journal* 10:18-39.

SOU (2000) Framtidens miljö – allas vårt ansvar. Slutbetänkande av Miljömålskommittén, SOU 2000:52, Stockholm.

SNA (1995) Klimat, sjöar och vattendrag. Sveriges Nationalatlas, Bra Böcker, Höganäs,

Wallén, C.C. (1966) Global solar radiation and potential evapotranspiration in Sweden, *Tellus* Vol. 18(4), 786-800.

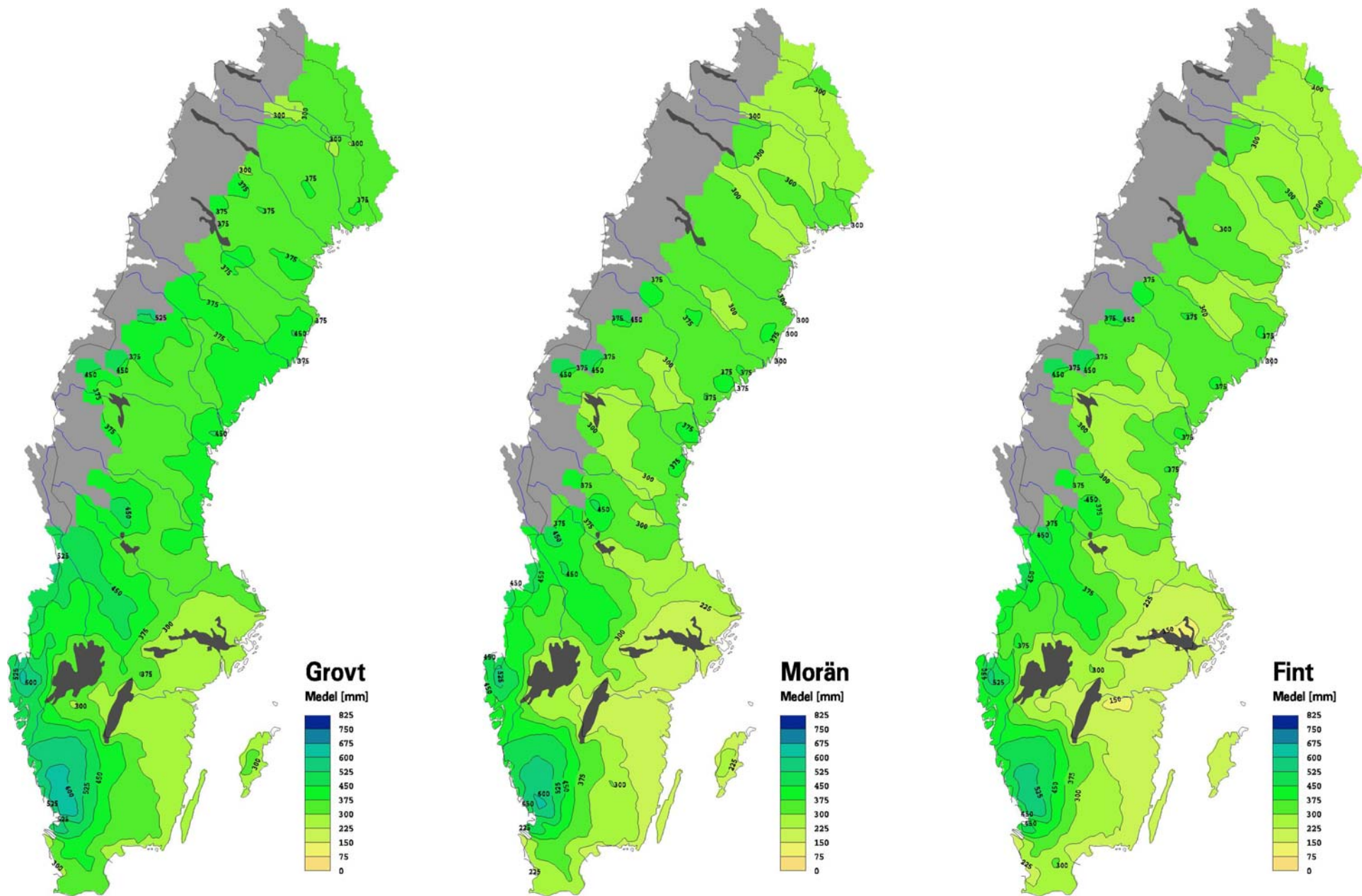
Använda data

SGUs jordsartskarta i digital form, ur SGUs jordartsgeologiska databas. © Sveriges Geologiska Undersökning (SGU).

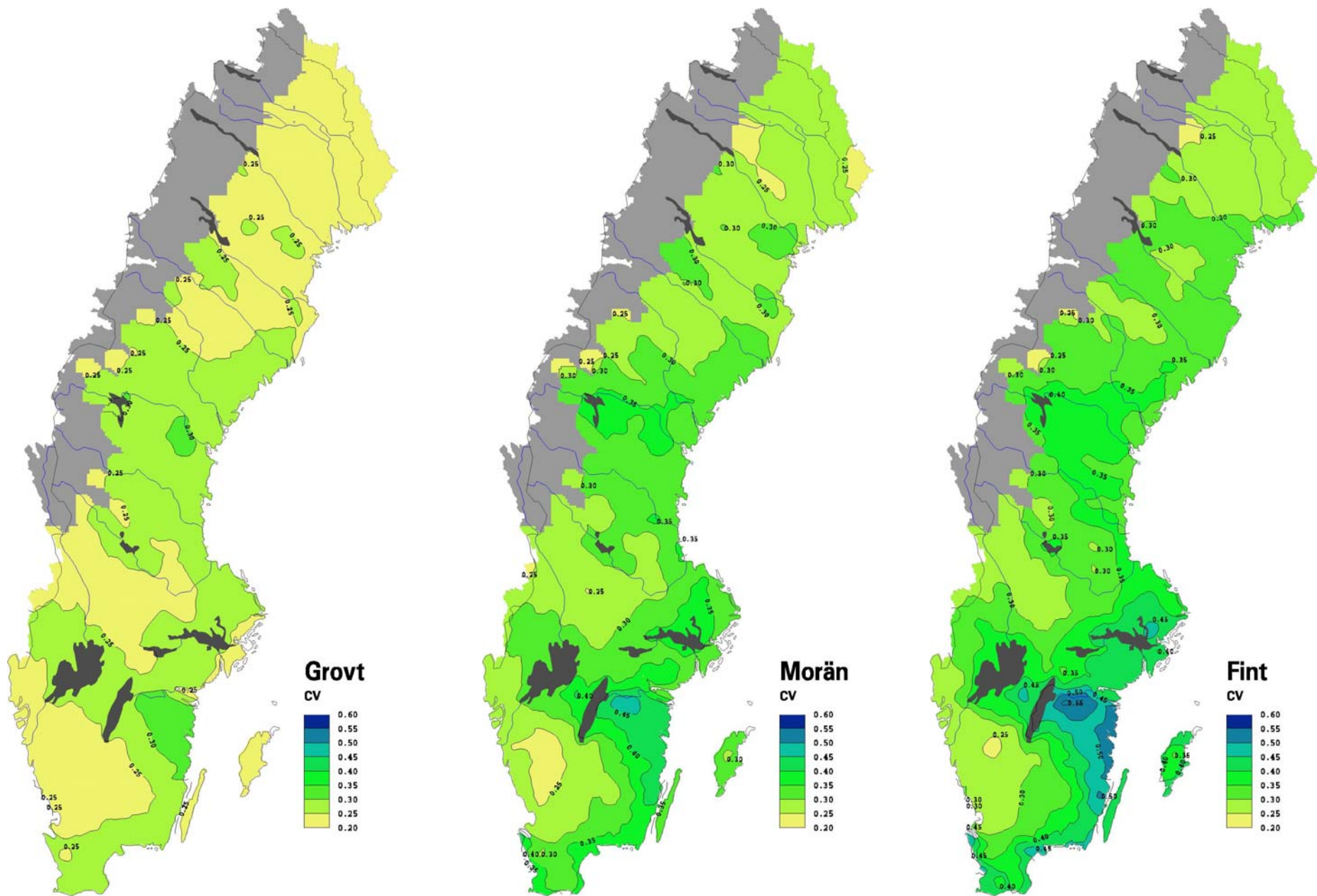
Databaser vid SMHI över lufttemperatur, nederbörd, vattenföring, avrinningsområden.

Potentiell avdunstning och lufttemperatur från Svartbergets försökspark, Sveriges lantbruksuniversitet, SLU.

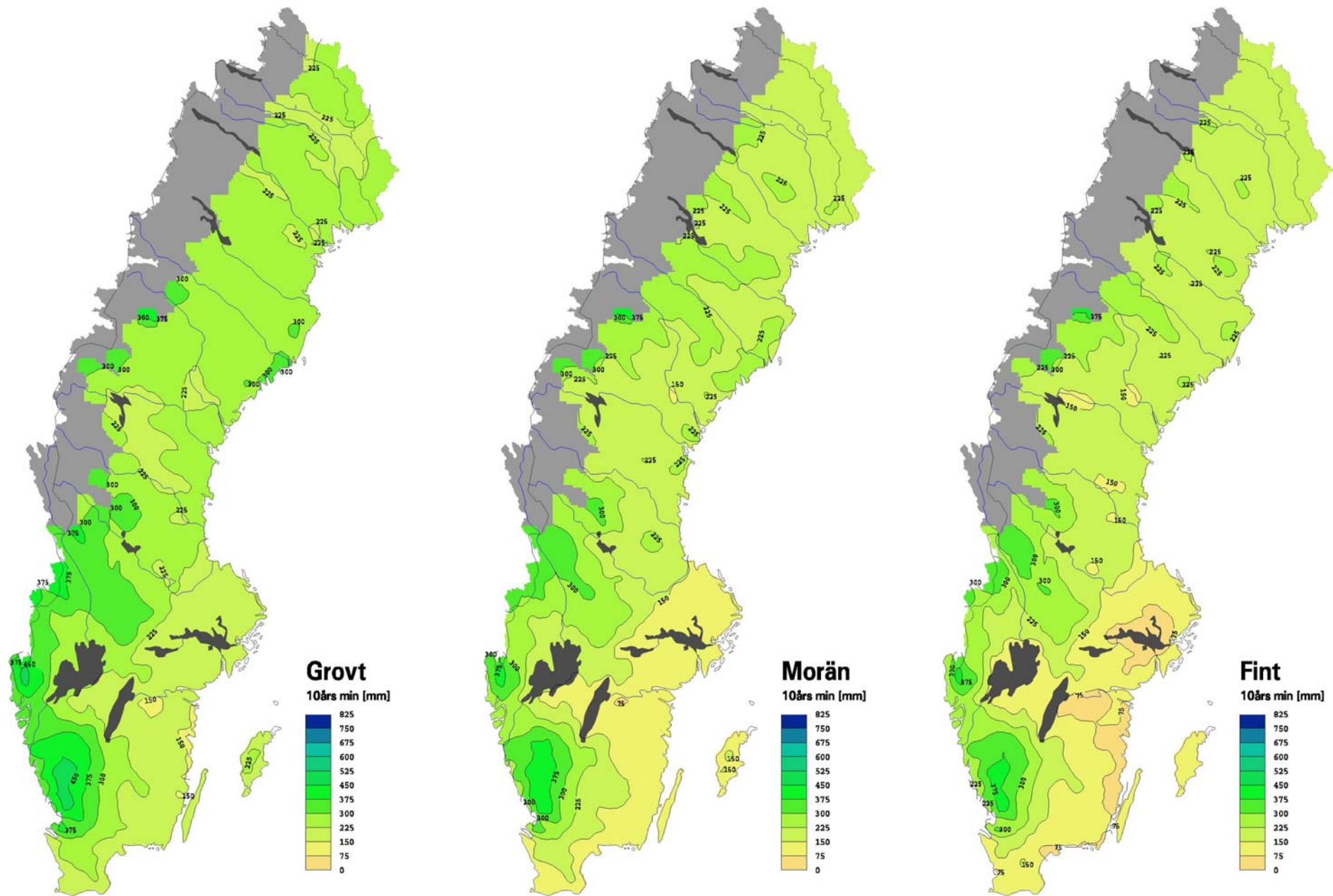
Potentiell avdunstning och lufttemperatur från Ultunas klimatstation, Sveriges lantbruksuniversitet, SLU.



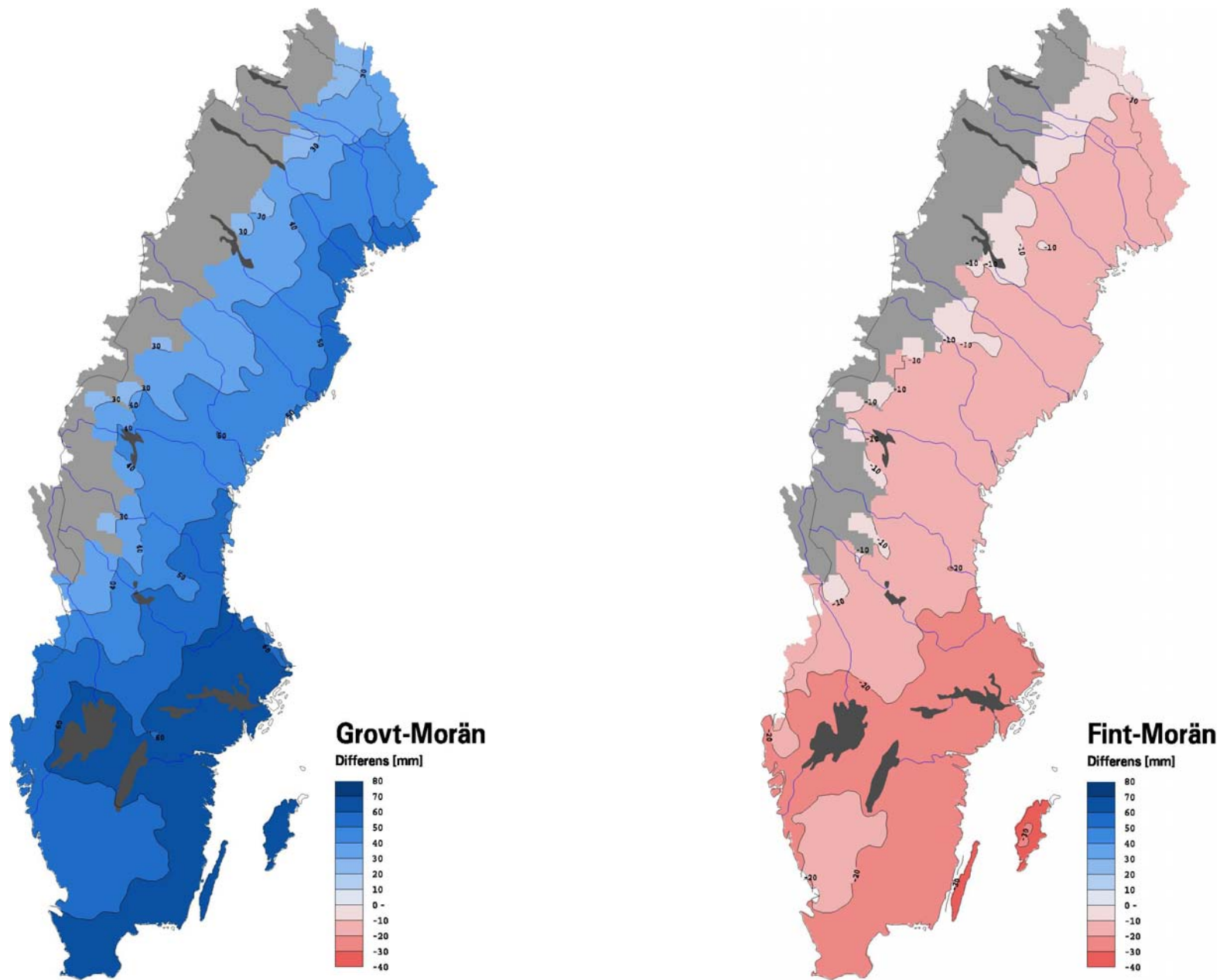
Appendix. *Figur A1. Beräknad grundvattenbildning i de tre markklasserna (mm/år). Flerårsmedelvärden ur nederbörds- och temperaturdata 1962-2003. Beräkningarna har inte gjorts för fjällområden (grå yta)*



Figur A2. Variationskoefficient (= standardavvikelse/medelvärde) hos den årliga grundvattenbildningen
Beräkningarna har inte gjorts för fjällområden (grå yta).



Figur A3. Grundvattenbildning (mm/år) som statistiskt sett underskrids ett år av 10, "10-årstorken". Beräkningarna har inte gjorts för fjällområdena (grå yta).



Figur A4. Skillnad mellan grundvattenbildningens flerårsmedelvärde i grov jord och morän, respektive fin jord och morän (mm/år). Beräkningarna har inte gjorts för fjällområden (grå yta).