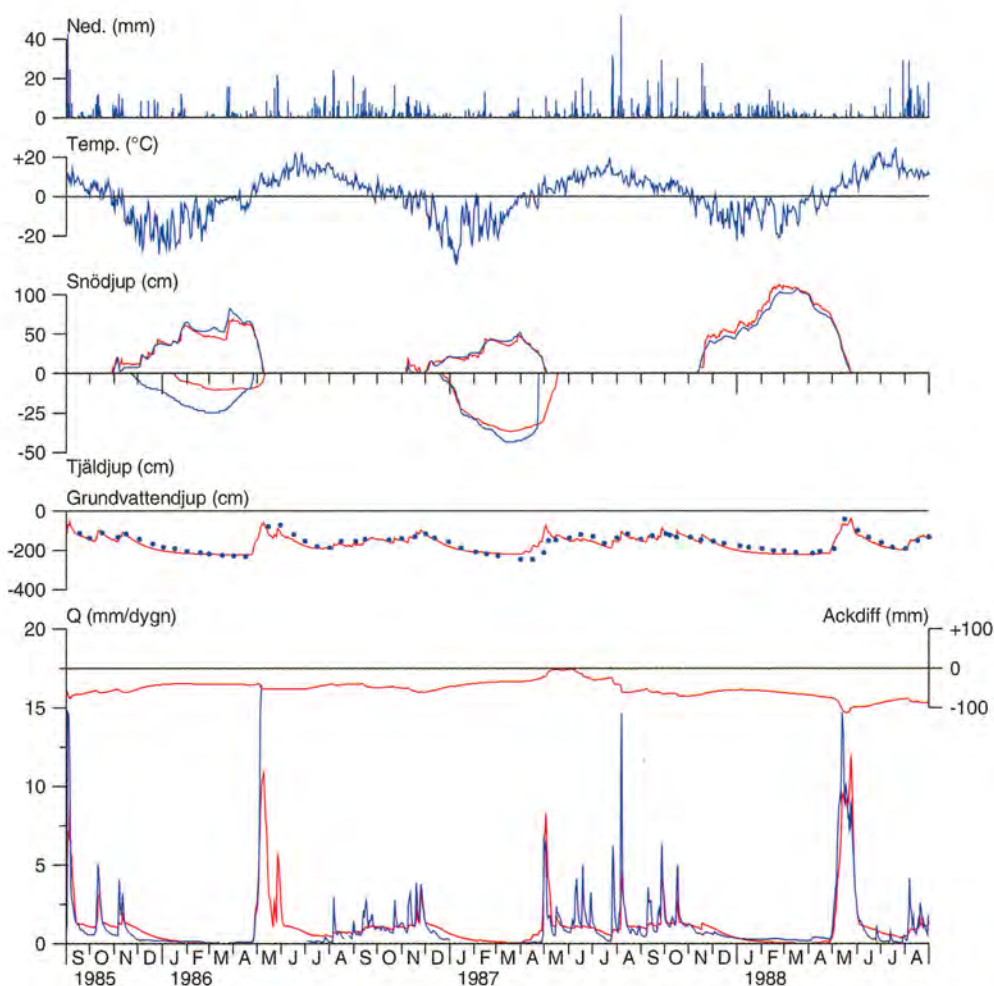




Tjäle och avrinning i Svartberget – studier med HBV-modellen

Göran Lindström
Mikaell Ottosson Löfvenius

Tjäle och avrinning i Svartberget – studier med HBV-modellen

**Göran Lindström, SMHI
Mikaell Ottosson Löfvenius, Vindelns Försöksparker,
Sveriges Lantbruksuniversitet**

SAMMANFATTNING

Det finns åtskilliga studier som tyder på att avrinningen från öppen mark, särskilt jordbruksmark, påverkas av tjäle. För skogsmark är förhållandena mindre undersökta. Tjälens inverkan på avrinningen undersöktes mha ett mycket fint datamaterial insamlat vid Svartbergets försökspark nära Vindeln i Västerbotten. Bland annat har snödjup, marktemperatur och tjäldjup mätts sedan 1980, vid tre platser. En av mätplatserna är belägen i gammal granskog och de två andra på öppen mark. Dessutom fanns grundvattendata att tillgå från området.

Simuleringsresultat från HBV-modellen, i vilken ingen effekt av tjälen antas, jämfördes med uppmätta tjälförhållanden i skogen. Ingen tydlig effekt av tjälen kunde urskiljas, på detta sätt eller genom analys av mätningar med den konservativa syreisotopen ^{18}O . Marken under skogen tjälas endast ungefär vartannat år. Under flera vintrar tinade tjälen dessutom upp innan vårfloden kom igång. Nästan alla vårflödena inträffade då marken var otjälad. Tjälens eventuella inverkan har mindre betydelse eftersom det så få vintrar finns kvar tjäle när vårfloden kulminerar. Vintrar med djup tjäle är ofta ganska snöfattiga och resulterar i låga flöden. Om dessa måttliga flöden påverkas eller ej har liten betydelse för uppkomsten av översvämningar. Slutsatserna gäller i första hand för gammal granskog i Svartberget. De två öppet belägna mätplatserna uppvisar mycket djupare och mer långvarig tjäle.

En enkel modell för beräkning av snödjup och tjäldjup sattes upp. Densiteten för snön antogs bero av snöns medelålder. Resultaten var ganska goda. Tjäldjupet kunde beräknas någorlunda noggrant med en enkel modell som framförallt styrs av en utjämnad lufttemperatur. Genom att HBV-modellen kalibrerades mot både vattenföring och snödjup erhöles en möjlighet att uppdatera modellen mha snödjupsmätningar. Modellen kunde fås att stämma ganska bra överens med uppmätta värden på snödjup, grundvatten, tjäldjup och vattenföring samtidigt, efter samtidig kalibrering mot dessa variabler.

FÖRORD

VASO/HUVA stödde under åren 1996-1998 två projekt med inriktning på mätning och modellering av sambandet mellan tjäle och avrinning. Det ena projektet bedrevs av Kevin Bishop, SLU i Umeå (senare SLU i Uppsala) och Lars Nyberg, Avd. för Hydrologi, Uppsala Universitet, och det andra bedrevs vid SMHI. Det sistnämnda projektet kallades för "Tjäle och avrinning". De två projekten bedrevs i nära samarbete, med Svartbergets försökspark i Västerbotten som utgångspunkt.

Det ovanligt fina datamaterialet från Svartberget möjliggjorde en breddning av arbetet till att även omfatta studier av snöförhållandena vid olika platser. En avsikt med samarbetet var att koppla ihop fältmätningar, fysikalisk modellering för förståelse av processer från universitetsvärlden och erfarenheten av operationell modellering från SMHI.

Arbetet med denna rapport har fördelats så att Mikael Ottosson Löfvenius huvudsakligen har bidragit med att granska och primärt bearbeta mätdata från Svartbergets försökspark medan Göran Lindström svarar för övrig bearbetning och innehåll.

HUVA (Hydrologiskt UtvecklingsArbete) inom VASO överfördes sedermera till ELFORSK. ELFORSK via HUVA tackas härmed för finansieringen av projektet. Ett särskilt tack riktas också till Tomas Lundmark och Christer Degermark vid Svartbergets försökspark som på ett avgörande sätt har bidragit till att mätdata har samlats in från området. Tack också till andra kollegor, särskilt Kevin Bishop och Lars Nyberg, som på ett eller annat sätt har bidragit till detta arbete.

1.	BAKGRUND	1
2.	MÅLSÄTTNING	2
3.	OMRÅDESBESKRIVNING OCH MÄTDATA	2
3.1	OMRÅDESBESKRIVNING	2
3.2	ANALYS AV MÄTDATA	3
3.2.1	<i>Grundvatten.....</i>	<i>3</i>
3.2.2	<i>Snödjup, tjäldjup och marktemperatur.....</i>	<i>4</i>
4.	METODIK.....	11
4.1	BESKRIVNING AV HBV-MODELLEN.....	11
4.2	ANPASSNINGSMÅTT	13
4.3	TJÄLDJUP OCH FLÖDESVÄGAR.....	15
4.4	MODELLERING AV TJÄLDJUPET	16
4.4.1	<i>Modellbeskrivning</i>	<i>16</i>
4.4.2	<i>Samtidig kalibrering.....</i>	<i>18</i>
5.	RESULTAT	18
5.1	AVRINNING OCH TJÄLFÖRHÅLLANDEN	18
5.2	MODELLERING AV TJÄLDJUPET	20
5.3	UPPDATERING AV SNÖTÄCKET	28
6.	SLUTSATSER.....	30
7.	REFERENSER.....	30

1. BAKGRUND

I större delen av Sverige är vårfloden den dominerande hydrologiska händelsen under ett år. Mer än halva årsnederbörden kan lagras som snö och rinna av under snösmältningen. Att förutsäga vårflodens start och fortsatta utveckling är av stor ekonomisk betydelse för drift av vattenkraftssystemet. I Sverige används framförallt HBV-modellen (Bergström, 1976 och 1995) för denna typ av prognoser. Flera försök att förbättra modellen i detta avseende har gjorts i VASO/HUVAs regi, t.ex. av Arnér (1991), Häggström och Sahlberg (1993), Lindström m.fl. (1996 och 1997) samt Johansson m.fl. (1998). Vid modellering av snösmältning tas normalt endast hänsyn till lufttemperaturen. Däremot tas ingen hänsyn till värmeutbytet med marken eller någon inverkan på avrinningen från tjälen.

Det är en vanlig uppfattning att tjälen skulle leda till snabbare och ytligare avrinning än normalt. Jansson och Gustafson (1987) fann att ytavrinningen hade stor betydelse i ett litet försöksområde i jordbruksmark, Röbbäcksdalen, utanför Umeå, i synnerhet i samband med tjäle. Tjälens betydelse i åkermark påpekades även av Bengtsson m.fl. (1992), baserat på resultat från ett litet försöksområde i södra Finland. Tjälförhållandena i skog är, å andra sidan, mindre undersökta. Shanley och Chalmers (1999) kom fram till att regn på ett litet jordbruksområde gav upphov till högre flöden vid tjälade än vid otjälade förhållanden, men att effekten i ett större område (111 km²) var försumbar.

Frågan om tjäle och avrinning blev av en tillfällighet extra aktuellt. Den kalla vintern och ringa snötillgången under 1996 ledde till rekorddjup tjäle. Man spekulerade då i att grundvattenbildningen skulle bli mindre än normalt p.g.a. tjälen. I maj 1997 uppkom så mycket höga flöden i Klarälvens älvdal, särskilt i trakten kring Sysseleback. Återigen framfördes åsikten att tjälen bidrog till att förvärra de höga flödena.

Att grundvattnet har en viktig roll i avrinningen, även under vårfloden, har rapporterats från många delar av världen (Sklash och Farvolden, 1979 och Rodhe, 1987, m.fl.). Detta gäller kanske särskilt för tunna moränjordar, såsom dem vi har i Sverige. Brandt m.fl. (1987) beräknade mha HBV-modellen maximala snösmältningsintensiteter i Sverige till att vara ca 40 mm/dygn i norr och 20 mm/dygn i söder. Dessa värden är långt under de infiltrationskapaciteter som anges av t.ex. Grip och Rodhe (1985). De redovisar värden för moränmark på åtminstone lika många mm varje timme som vad smältningen kan uppgå till på ett dygn. De anser vidare att infiltrationskapaciteten, även i tjälad mark, är tillräcklig för att allt smältvatten skall kunna infiltrera.

HBV-modellen utvecklades ursprungligen för beräkning av flödet i vattendrag. Sedan dess har även flera kontroller gjorts av modellens interna variabler. Exempelvis studerades grundvattennivåer av Bergström och Sandberg (1983), markvattenhalter av Andersson (1989) och snöförhållanden av Häggström (1994). Tester med den konservativa syreisotopen ¹⁸O gjordes av Lindström och Rodhe (1986). Modellen hade ibland svårt att beskriva den uppmätta ¹⁸O-halten i bäckvatten under snösmältningen, i synnerhet i Svartbergets försökspark i Västerbotten (Lindström m.fl., 1990). En möjlighet som diskuterades var att en större andel av smältvattnet skulle rinna av ytligt vid tjälade förhållanden än då marken var otjälad.

Vid modellering av snösmältning med HBV-modellen tas normalt endast hänsyn till luftens temperatur. Ingen hänsyn tas till värmeutbytet med marken eller tjälens eventuella inverkan på infiltration och avrinning. I Sverige har modellstudier av tjälens effekt på vattenflödet i främst jordbruksmark i liten skala gjorts av t.ex. Jansson och Gustafson (1987), Lundin (1989) och Johnsson och Lundin (1991). Engelmark (1984) simulerade infiltrationen i en frusen gräsbevuxen markyta. Fox (1992) lade in en tjälrutin i en vattenbalansmodell och menade att tjälförhållandena i marken kan vara viktiga för beskrivning av extrema flödestillfällen. Sand och Kane (1986) rapporterade förbättringar i flödessimuleringen mha HBV-modellen för ett område i Alaska när de lade in en tjälrutin i modellen, medan Vehviläinen (1992), å andra sidan, inte fann några förbättringar i Finland.

2. MÅLSÄTTNING

Målsättningen med detta arbete var att undersöka om tjäldjup och marktemperatur har någon väsentlig inverkan på snösmältning och vårflöde, och att se om man med hjälp av denna kunskap kunde förbättra simuleringen av vårflöden med HBV-modellen.

3. OMRÅDESBESKRIVNING OCH MÄTDATA

3.1 Områdesbeskrivning

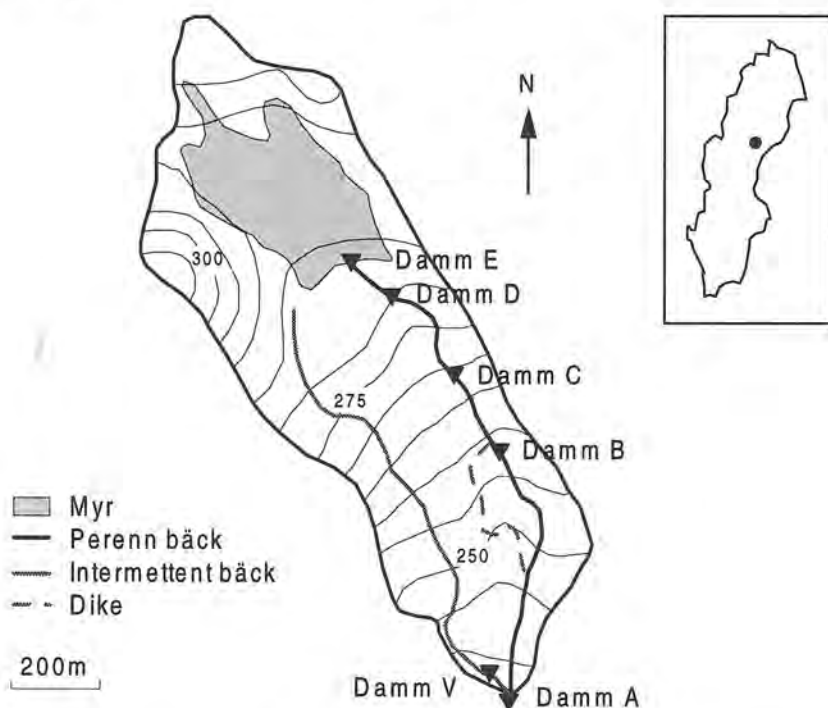
Arbetet utfördes med stöd av mätdata från Svartbergets försökspark (Figur 1) nära Vindeln i Västerbotten (64° 14' N, 19° 46' E). Försöksparken har länge utnyttjats för forskning (inrättades 1923) och innehåller även ett avrinningsområde (Figur 1), med ett antal vattenföringsstationer, som kan anses vara ganska representativt för stora delar av Norrlands inland. Avrinningsområdet är litet och utan stora höjdskillnader. Den areella variationen i t.ex. snötäcket är därmed ett mindre problem än i stora avrinningsområden. Marktemperatur och tjäldjup har mätts vid tre referensstationer inom försöksparken sedan 1980.

De hydrologiska förhållandena i Svartberget har studerats i detalj av bl.a. Bishop (1991). Han bekräftade grundvattnets aktiva roll vid flödestillfällen, men studierna avsåg framförallt förhållandena under sommaren. Medeltemperaturen över året är +1.3° C, för perioden 1980-98, och den okorrigerade årsmedelnederbörden har under samma period varit 600 mm. Avrinningen är ca 325 mm årligen. Ungefär halva avrinningen äger rum under den snöfria halvan av året (juni-november), och en tredjedel av avrinningen sker under 3-4 veckors vårflöde i april eller maj. Förutom en öppen myr (8 ha), är avrinningsområdet täckt av granskog på lägre, blötare områden, och tallskog på högre belägna och bättre dränerade områden. Podsoljordarna, som täcker det mesta av området, har utvecklats över en flera meter tjock morän. Närmast de två små bäckarna Kallkällbäcken och Västrabäcken ersätts podsolen av torv. Båda bäckarna dikades under 1920-talet till ungefär en meters djup. Den bäcknära zonen på cirka 10-20 meter täcks utmed de båda bäckarna av torv med en mäktighet på 20-80 cm, ovanpå mineraljorden (Bishop, 1994).

Avrinningen har mätts kontinuerligt i en överfallsdamm sedan 1981. Arealen uppströms huvuddammen är ca 0.5 km². Vattenföringen räknas ut för varje dygn utifrån medelvattenståndet (beräknat som medelvärdet av min- och maxvattenstånden under dygnet). Tjälldjup, snödjup och marktemperatur har mätts sedan 1980 vid följande referensstationer:

- GG = Station Gammal Granskog
- HY = Station Hygget
- HE = Station Heden.

Stationen HY är belägen på en öppen skogfri yta om cirka 1 hektar på en moränsluttning, och stationen HE på en cirka 2 hektar skogfri yta på sedimentmark i anslutning till moränsluttningen. Med början i oktober 1995 har Bishop och Nyberg mätt markvattenhalt mha TDR (Time Domain Reflectometry) i sitt delprojekt inom avrinningsområdet, som ett mer detaljerat komplement till de äldre mätningarna.



Figur 1. Karta över Nyänges avrinningsområde, Svartbergets försökspark, nära Vindeln i Västerbotten.

3.2 Analys av mätdata

3.2.1 Grundvatten

Grundvattenobservationer erhöles från SGU, för rören 101, 102, 103, 104 och 105. Rör 101 står överst i avrinningsområdet, i morän, och rör 104 står närmast bäcken, ca 10 m från bäcken. Rör 102 och 103 står på samma plats, men mäter på olika djup. De två sistnämnda uppför sig väldigt lika. Ytterligare ett rör, 105, finns, men ligger utanför området. Nivån i de

enskilda rören följer varandra väl (Figur 2), fast på olika djup. Några uppenbart felaktiga värden rättades. Som ett integrerat mått på grundvattennivån beräknades ett viktat medelvärde av grundvattennivåerna i rören:

$$medel = \frac{1}{3} \cdot rör101 + \frac{1}{6} \cdot rör102 + \frac{1}{6} \cdot rör103 + \frac{1}{3} \cdot rör104.$$

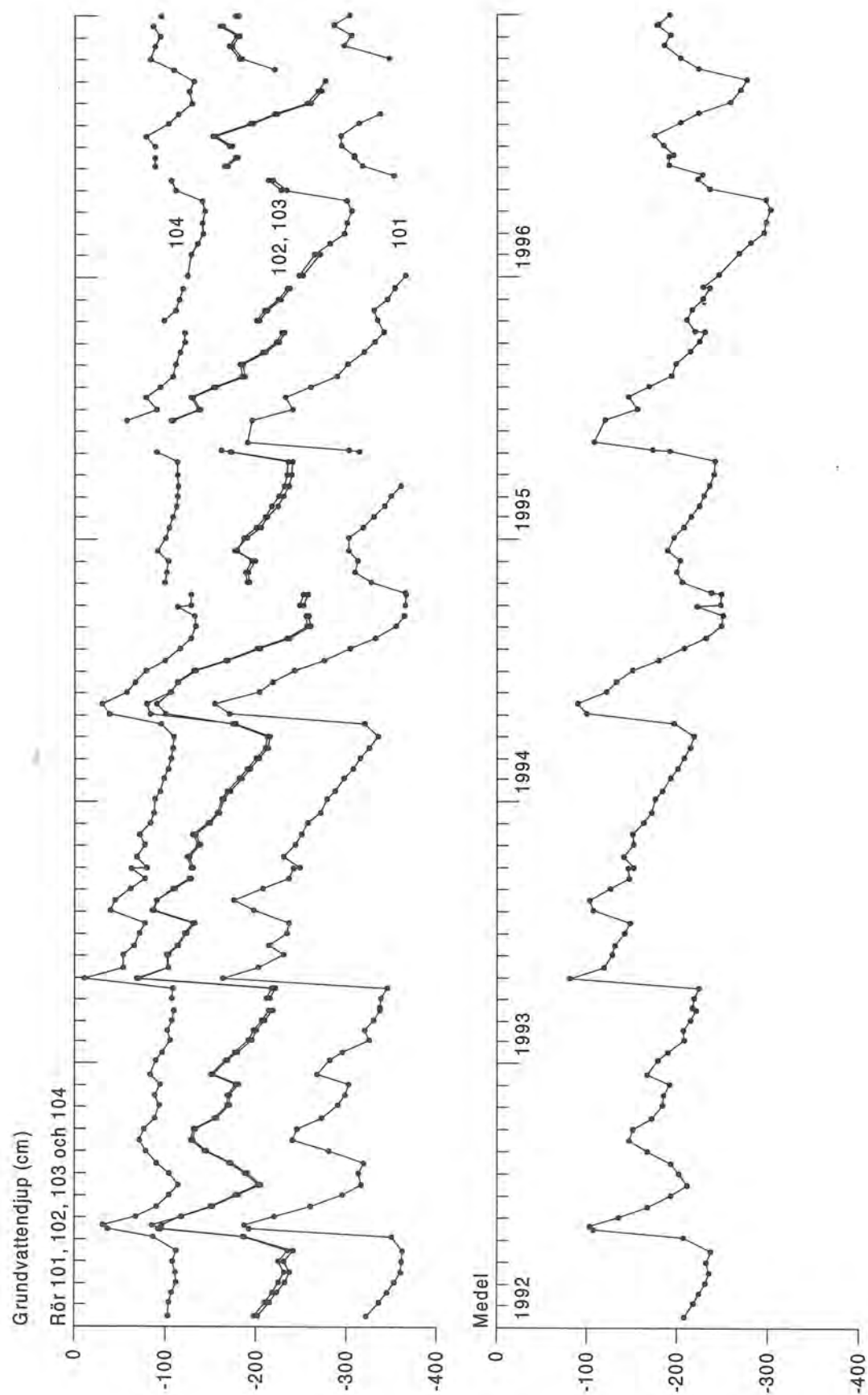
Medelvärdet beräknades ej då något av rören saknades. Till exempel saknades uppgifter från flera rör vintern 1995 eftersom grundvattennivåerna hade sjunkit för djupt. Luckor i medelvärdesserien fylldes här i med regression. För varje dag valdes det av de rör, för vilka en mätning fanns, som var bäst korrelerat med medelserien. Korrelationen mellan medelserien och de ingående rören låg mellan 0.94 och 0.99, vilket betyder att de ifyllda värdena bör vara ganska tillförlitliga.

3.2.2 Snödjup, tjäldjup och marktemperatur

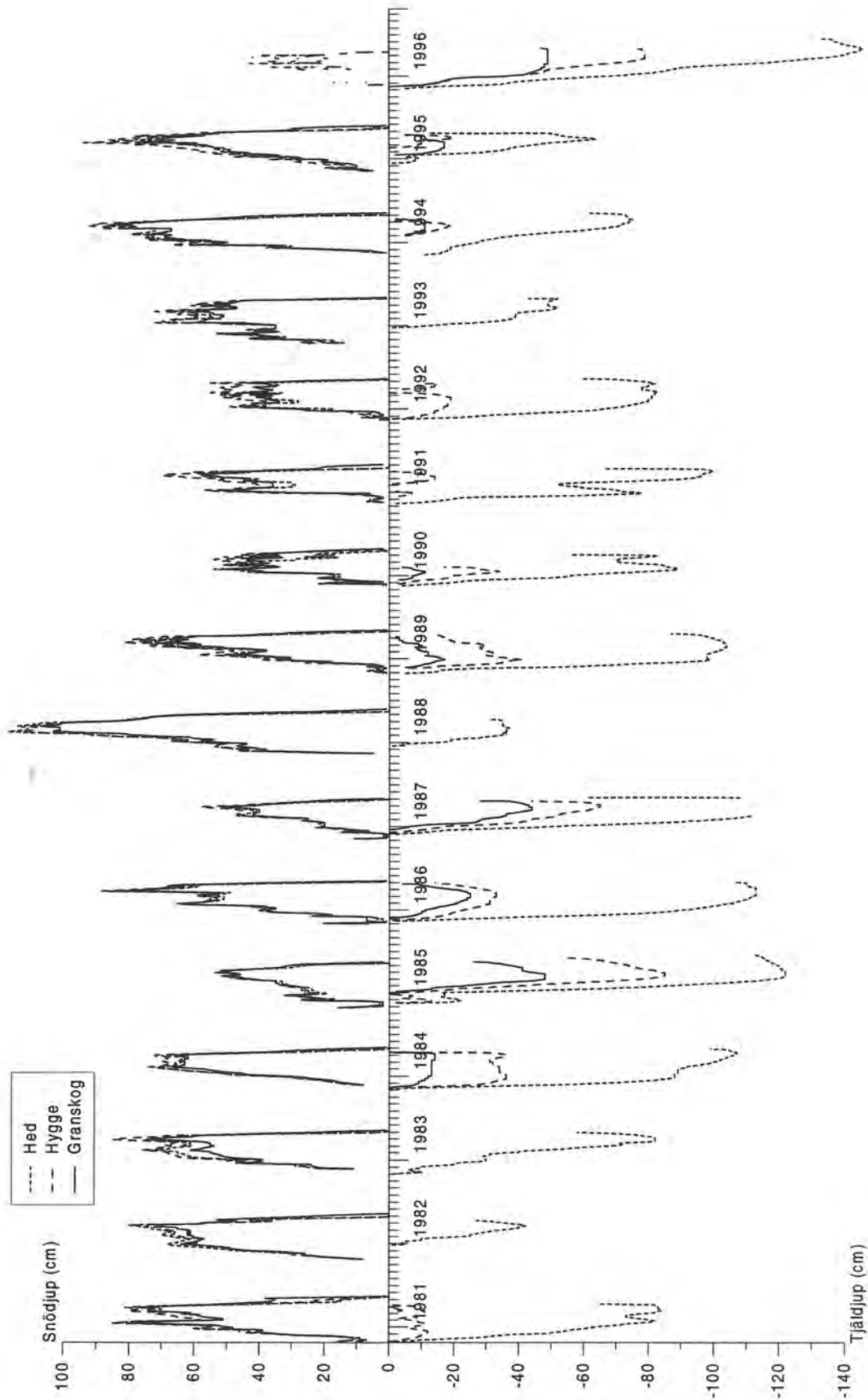
Mätningar och bearbetningar av snödjup och tjäldjup har gjorts under lång tid vid Svartbergets försökspark. Mätningarna av såväl tjäldjup, snödjup som marktemperatur redovisas årligen i årsrapporterna "Klimat och vattenkemi vid Svartberget". Snödjupet och tjäldjupet har lästs av manuellt cirka en gång i veckan under åren 1980–1991 (Figur 3). Tjäldjupet har bestämts med hjälp av gipsblock och marktemperatur. Under senare år har gipsblocken och marktemperaturen registrerats automatiskt varje timme. Snödjupet för vart och en av de tre mätplatserna (HE, HY och GG) beräknas som medelvärdet av fem fasta snödjupskäppar. Linjär interpolering har gjorts mellan avläsningstillfällena för att skapa en serie med dagliga värden. Stora förändringar av snödjupet som skett mellan mättillfällena kan därmed få en tidsförskjutning på upp till en vecka.

De uppmätta marktemperaturerna har använts som stöd till analysen av gipsblocken vid framtagandet av tjäldjupskurvorna. Tjäldjupsdata för denna studie avser endast perioder då marken varit huvudsakligen tjälad, perioder då det funnits en blandning av is och vatten i marken har således inte analyserats. Under vintern 1985-86 var tjäldjupet vid stationen HE så djupt att givarna inte kunde registrera det exakta djupet, och under vintern 1988-89 förekom snödrev som störde mätningarna av snödjupet. I mars 1990 trampade renar ner snön vid samma station.

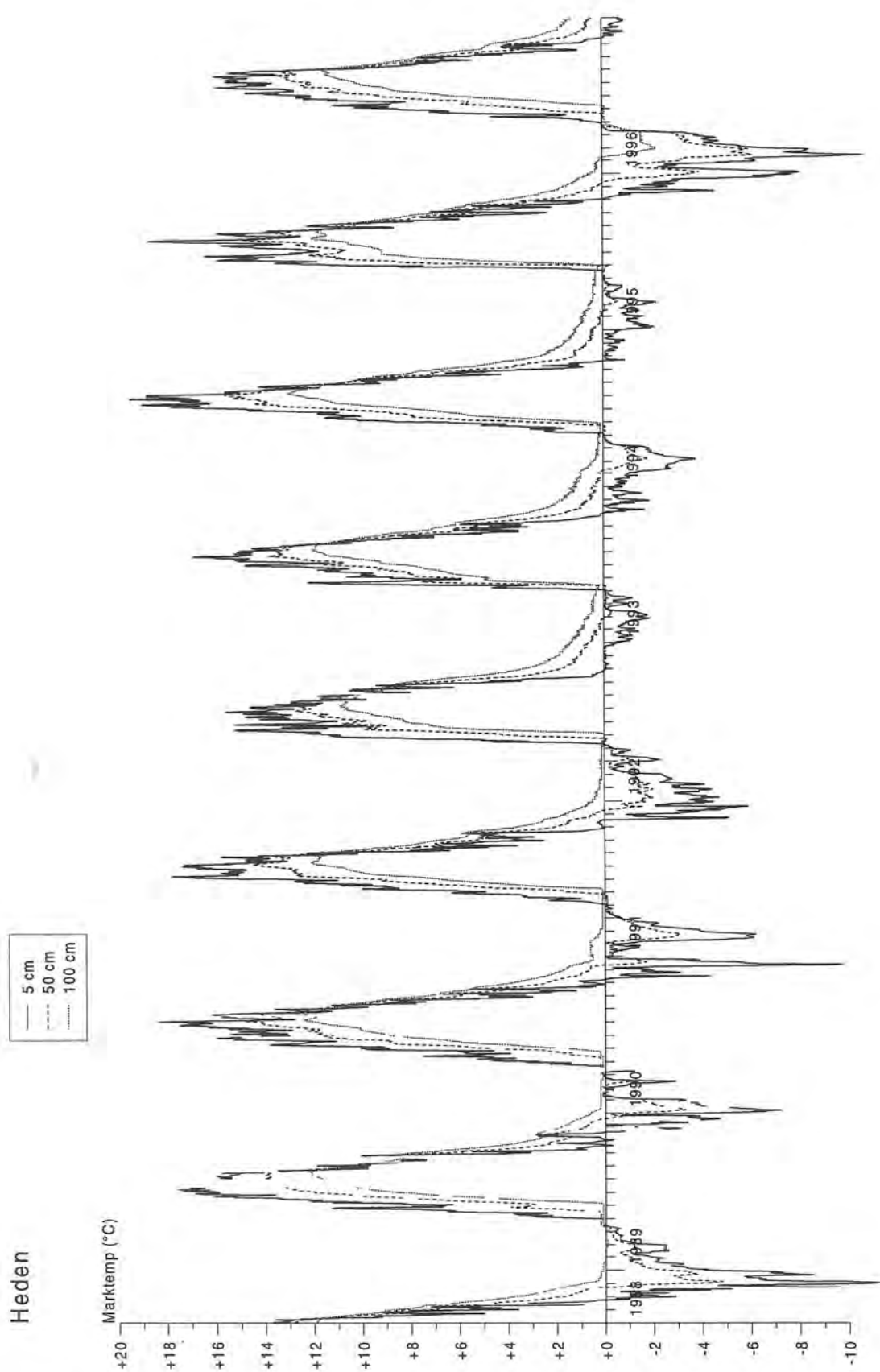
Marktemperatur har mätts på djupen 5, 10, 20, 50 och 100 cm under en orörd markyta. Utdrag ur tidsserier på dygnsmedelvärden för de tre mätplatserna visas i Figuren 4 till 6. Stationen GG var avstängd från november 1991 och drygt ett år framåt. Nya givare installerades vid stationerna HE och HY från säsongen 1990-91 och vid stationen GG från säsongen 1993-94.



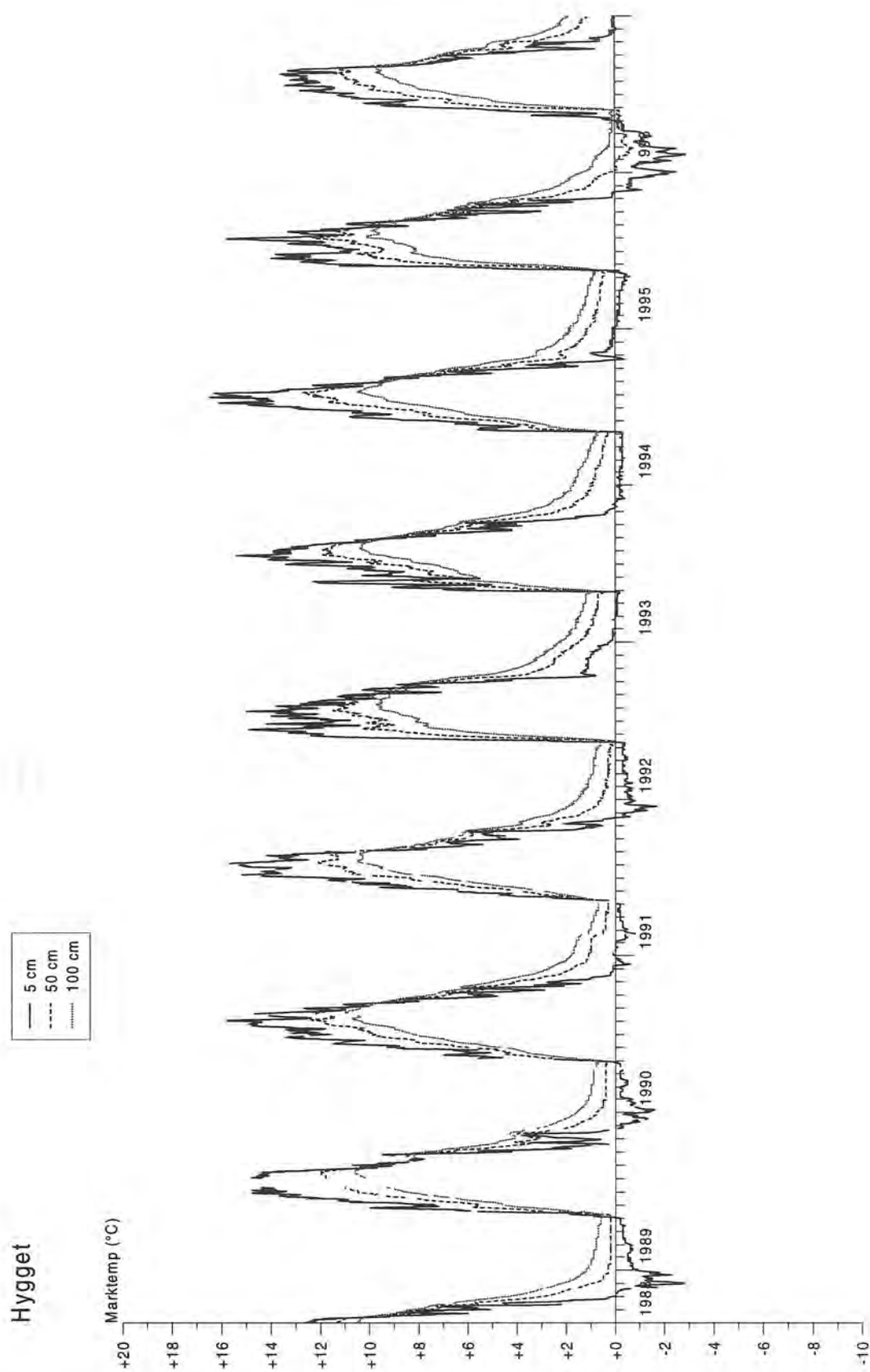
Figur 2. Exempel på uppmätta grundvattennivåer (fyllda cirklar) i Svartberget. Data från SGU.



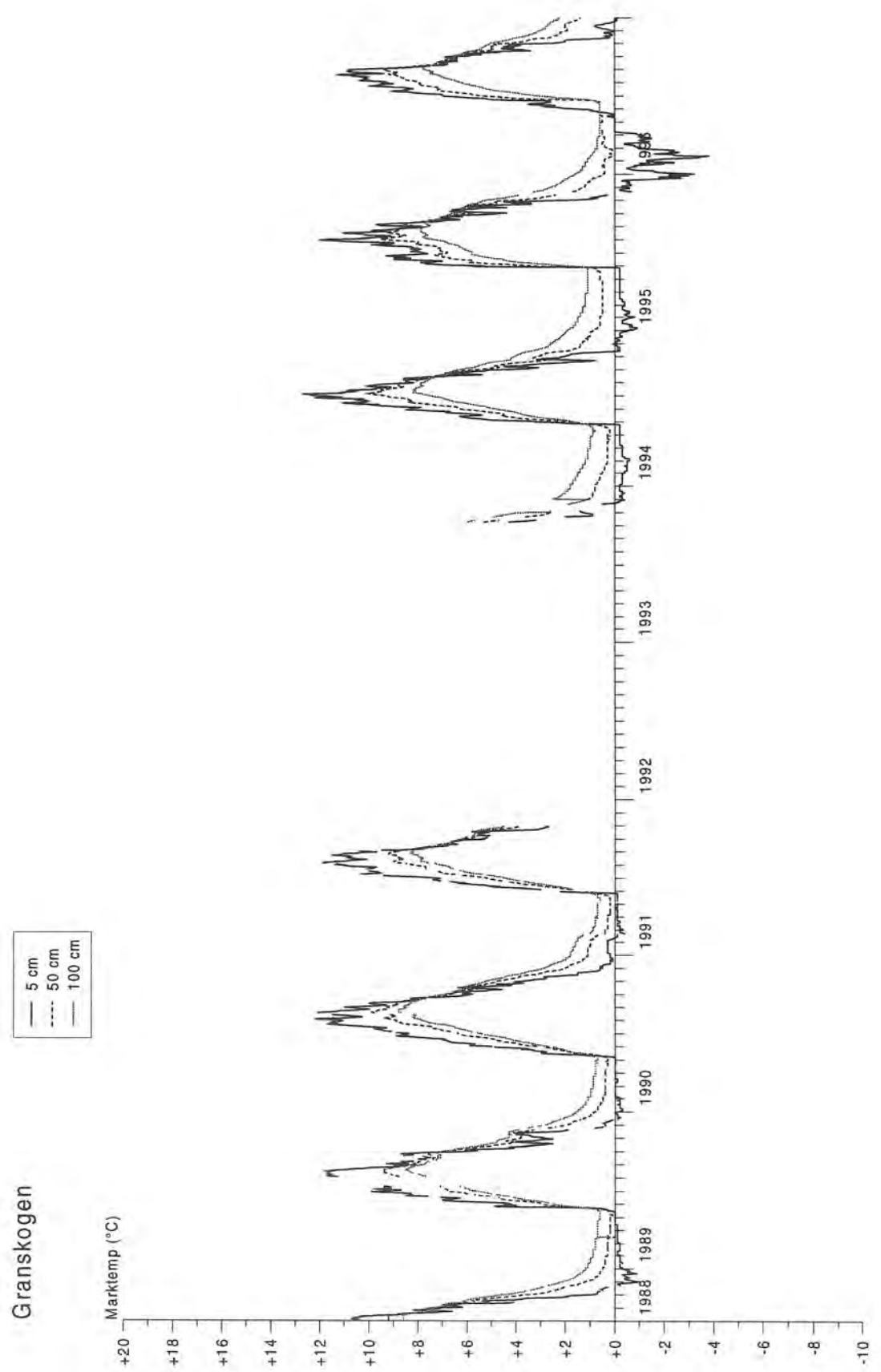
Figur 3. Mätningar av snödjup och tjåldjup i Svartberget. Data från Svartbergets försökspark.



Figur 4. Exempel på uppmätt marktemperatur vid stationen Heden. Data från Svartbergets försökspark.



Figur 5. Exempel på uppmätt marktemperatur vid stationen Hygget. Data från Svartbergets försökspark.



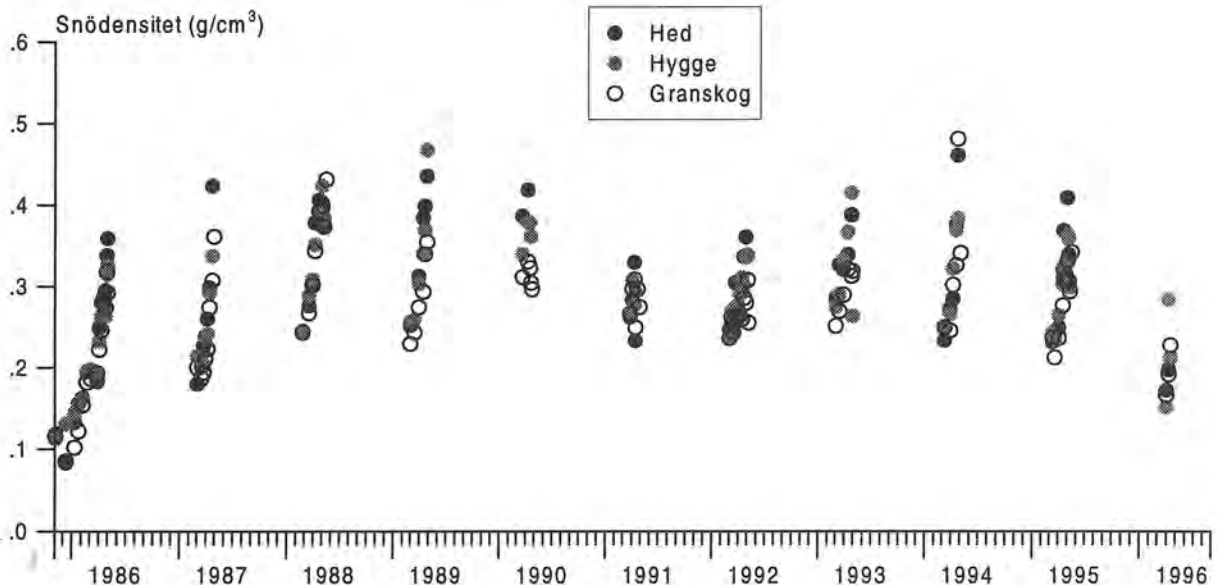
Figur 6.

Exempel på uppmätt marktemperatur vid stationen Granskog. Data från Svartbergets försökspark.

Ur de gjorda snödjupsmätningarna och samtidiga snötaxeringar med snörör vid de tre mätplatserna beräknades snöns densitet (Figur 7). Densiteten för de tre platserna var i medeltal ungefär densamma (Tabell 1).

Tabell 1. Snödensitet i medeltal för de tre mätplatserna.

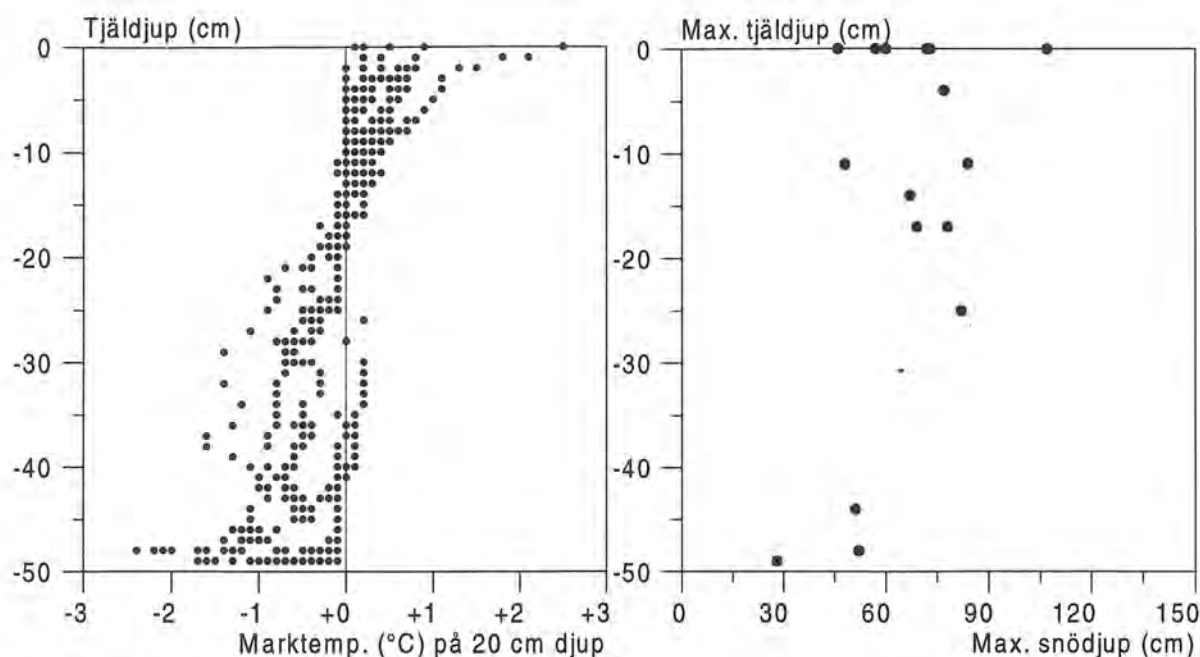
Mätplats	Hed	Hygge	Granskog
Densitet (g/cm ³)	0.32	0.29	0.28



Figur 7. Beräknade snödensiteter baserat på data från Svarbergets försökspark.

Den undersökta tidsperioden, 1981 till 1996, uppvisar stor variation i de uppmätta tjälförhållandena, med största tjäldjup på ca en halv meter i skogen och ungefär det dubbla vid de två öppna mätplatserna. Åtskilliga år var helt tjälfria i skogen.

Uppmätt marktemperatur och tjäldjup stämde väl överens. Av marktemperaturerna i granskogen var det den på 20 cm djup som var bäst korrelerad med tjäldjupet på samma plats, med en korrelation $r = 0.71$ (Figur 8). En beräknad medeltemperatur för de översta 50 cm gav inte bättre samvariation med tjäldjupet än vad temperaturen på 20 cm gjorde. Djupast tjäle uppkom under år med tunt snötäcke (Figur 8). De tre åren med djupast tjäle var 1985, 1987 och 1996. Alla dessa år var relativt snöfattiga, särskilt 1996. Figur 9 sammanfattar mätningarna för stationen Granskog och hur de olika variablerna i medeltal varierar över året.



Figur 8. Tjäldjup mot marktemperatur på 20 cm djup (t.v.) och maximalt tjäldjup under vintern mot maximalt snödjup under vintern (t.h.). Stationen Granskog. Data från Svartbergets försökspark.

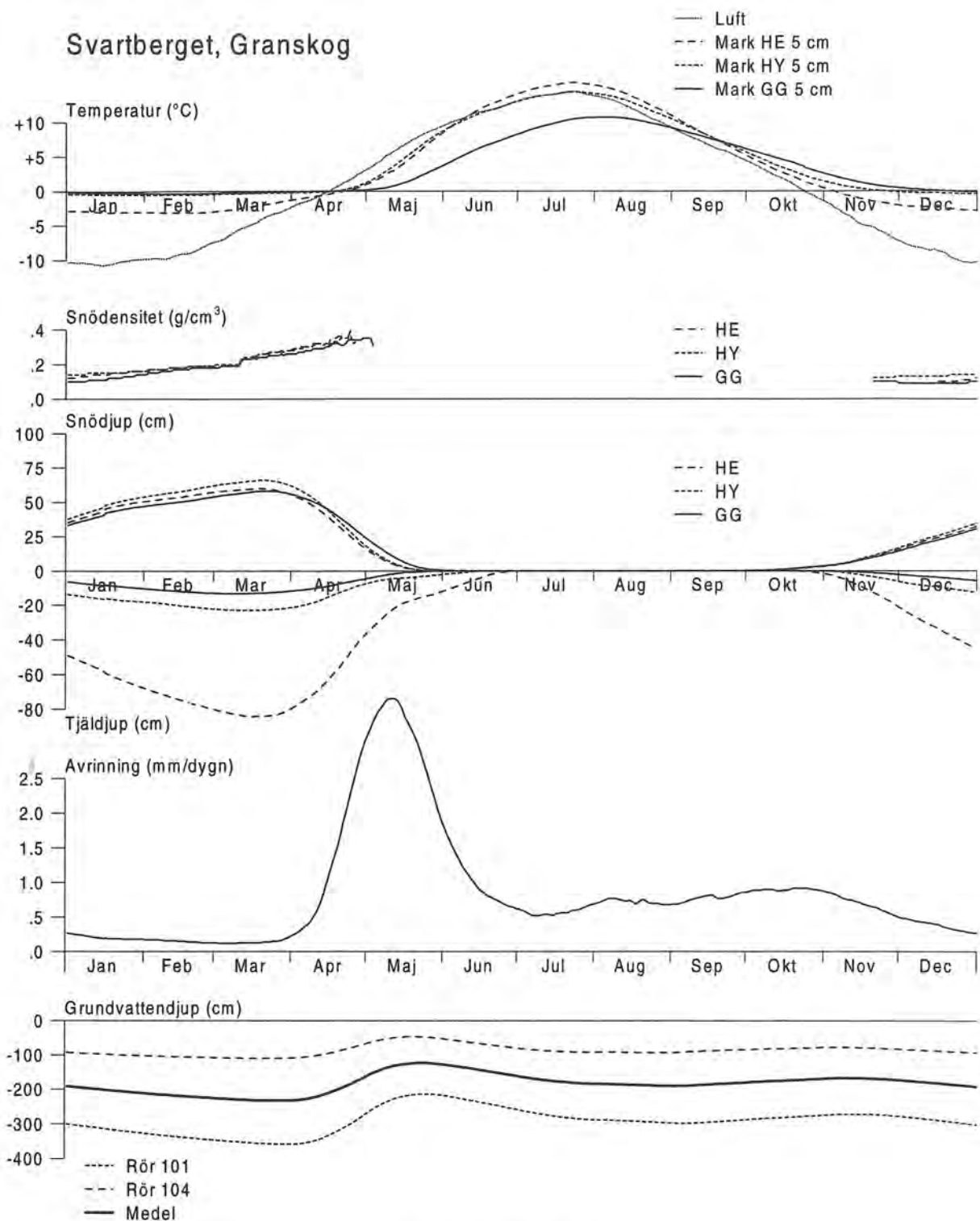
4. METODIK

4.1 Beskrivning av HBV-modellen

HBV-modellen (Bergström, 1976 och 1995) är en matematisk avrinningsmodell som genom åren har fått många tillämpningsområden med anknytning till vattenkraften, exempelvis flödesprognoser, dammdimensionering och studier av effekten av mänskliga ingrepp. En ny version av modellen, HBV-96, presenterades av Lindström m.fl. (1996 och 1997). I denna studie användes dock för enkelhetens skull den ordinarie HBV-modellen.

Modellen har ingen rutin för beräkning av tjäle, och indirekt antas därför att tjälens effekt på avrinningen är försumbar. Rimligheten i detta antagande studerades genom att modellens prestanda för olika år jämfördes med de uppmätta tjälförhållandena i Svartberget.

Eftersom HBV-modellen beskrivs mer utförligt av t.ex. Bergström (1976 och 1995), ges här endast en förenklad beskrivning (Figur 10).



Figur 9. Medelvärden över året (perioden 1981-1996) för de olika uppmätta variablerna i Svartberget, stationen Granskog, utjämnat mha rullande medelvärden över 1 månad. Bearbetning av data från Svartbergets försökspark och SGU.

Snösmältningen *MELT* beräknas i modellen mha graddagmetoden, i vilken snösmältningen är proportionell mot lufttemperaturen, *T*, över en tröskeltemperatur, *TT*, nära noll grader. Avrinningen, *R*, som andel av summan av regn och snösmältning, *I*, ökar med ökande markfuktighet *SM*. Detta gäller även förhållandet mellan aktuell, *EA*, och potentiell avdunstning, *EP*. *FC* anger det maximala markvattenmagasinet. Den genererade avrinningen rinner in i en övre grundvattenzon *UZ*. Denna zon dräneras med en konstant perkolation, *PERC*, ned till den undre zonen, *LZ*. Både den övre och den undre zonen töms mha recessionskoefficienter (*K0*, *K1* och *K2*). Ett linjärt, triangulärt, filter fördröjer avrinningen över koncentrationstiden *MAXBAS*. Eftersom det studerade området är så litet, gjordes ingen indelning i delområden eller höjdzoner. Modellen kördes med dagliga värden på nederbörd och temperatur från området som indata. Totalt kalibrerades 13 modellparametrar automatiskt enligt den metod som beskrevs av Lindström (1997). Hela dataperioden, 1 september 1980 till 31 augusti 1996, användes i denna kalibrering.

4.2 Anpassningsmått

Ett antal mått på hur väl HBV-modellen kunde beskriva vårflödena vid olika tjälförhållanden testades. Vårflödet inträffar normalt i april och maj (Figur 9), och området är vanligen snöfritt i slutet av maj. Under april och maj sker ca 45% av årets avrinning. För varje vår (april och maj) beräknades ett volymfel, V_E :

$$V_E = \sum_{t=1}^n Q_{com}(t) - \sum_{t=1}^n Q_{obs}(t)$$

och ett toppfel, P_E :

$$P_E = \max(Q_{com}(t)) - \max(Q_{obs}(t)).$$

Ett tidsfel, T_E , i snösmältningen beräknades som tidsskillnaden mellan tyngdpunkterna, cg , för de beräknade och uppmätta hydrograferna under april och maj, enligt:

$$cg = \frac{\sum_{t=1}^n t \cdot Q(t)}{\sum_{t=1}^n Q(t)}$$

och tidsfelet, T_E , bestämdes sedan som

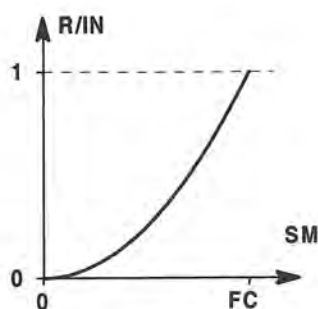
$$T_E = cg_{COM} - cg_{OBS}.$$

Detta mått visade sig stämma relativt väl överens med en subjektiv uppfattning om hur ett vårflöde var fördelat i tiden (Figur 11).

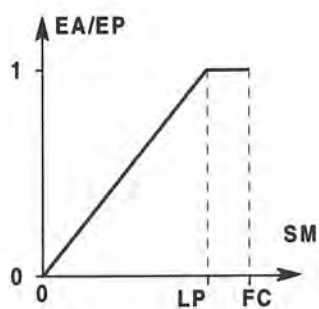
SNÖRUTIN

$$\begin{aligned} \text{MELT} &= \text{CFMAX} \cdot (T - T_T) & \text{OM } T > T_T \\ \text{DRAIN} &= \text{WC} - \text{CWH} \cdot \text{SP} & \text{OM } \text{WC} > \text{CWH} \cdot \text{SP} \end{aligned}$$

MARKRUTIN

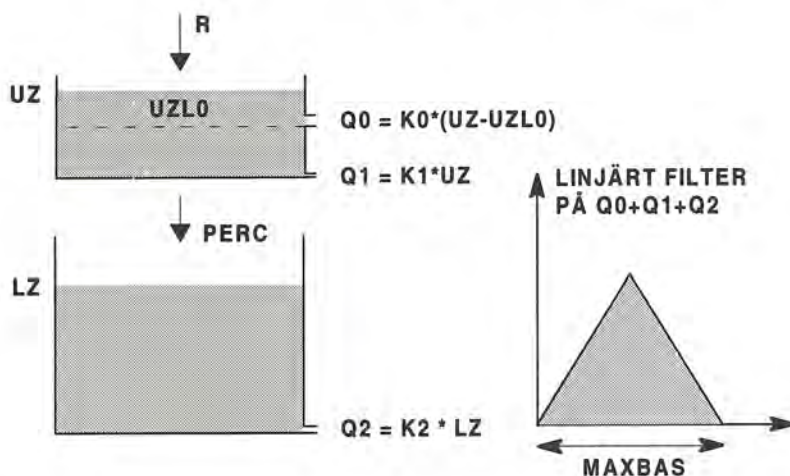


$$R/IN = (SM/FC)^{\text{BETA}}$$

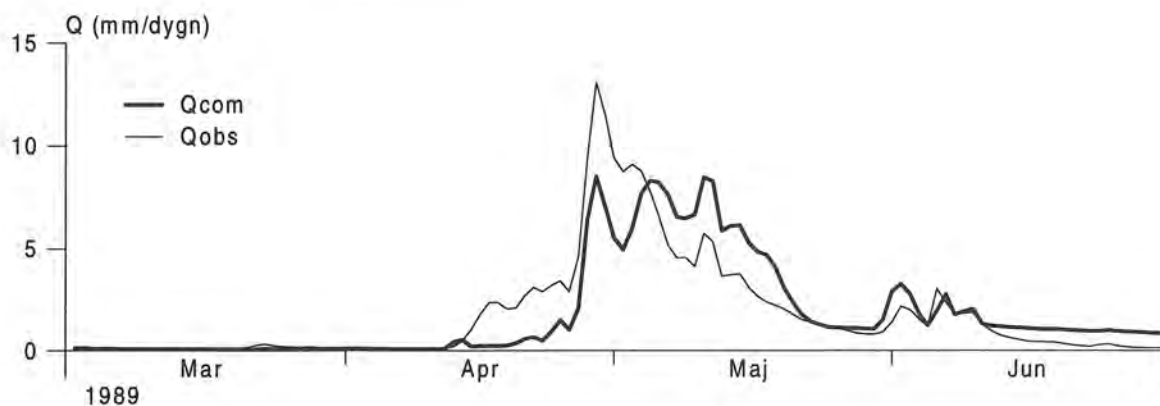


$$\begin{aligned} EA &= (SM/FC) \cdot EP & SM < LP \\ EA &= EP & SM \geq LP \end{aligned}$$

RESPONSRUTIN

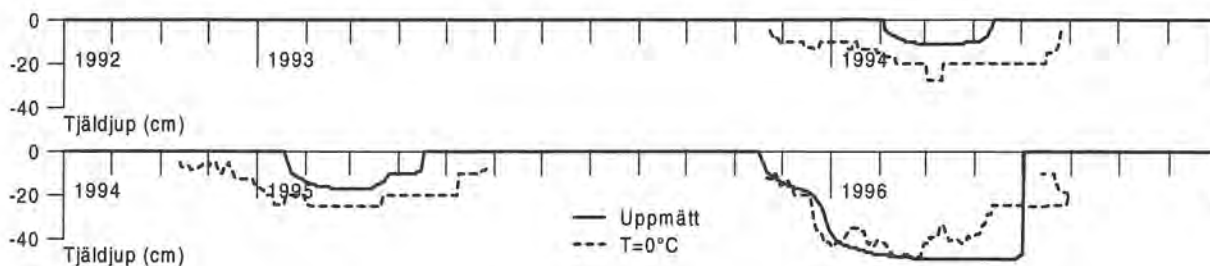


Figur 10. Schematisk modellstruktur för den använda HBV-modellen.

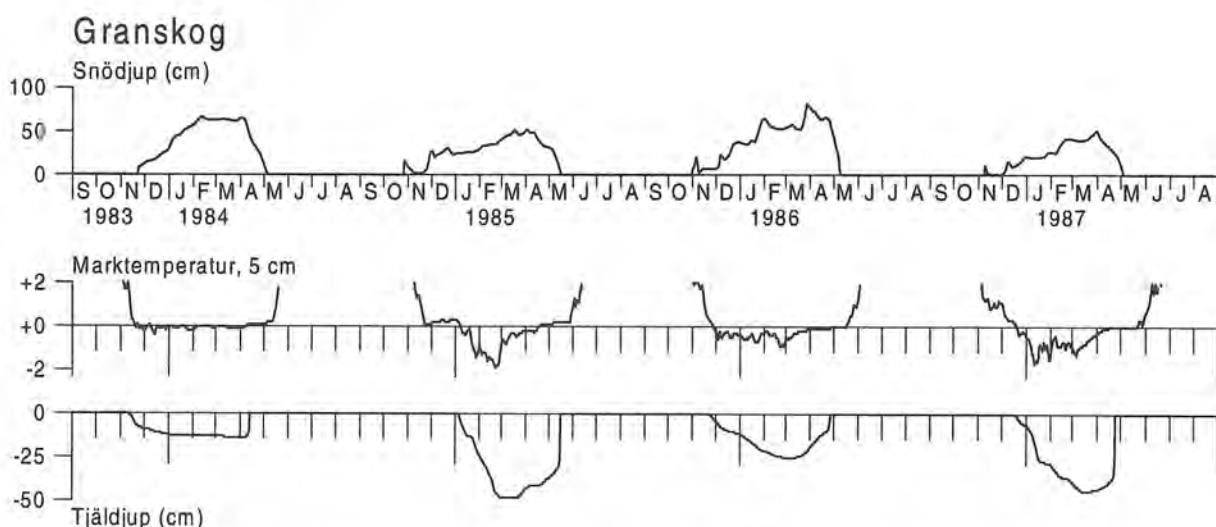


Figur 11. Illustration av innebörden av tidsfelet, T_E , som här för 1989 blev +5 dygn, dvs modellens beräknade flöde kom i genomsnitt 5 dygn för sent.

Som mått på tjälförhållandena i avrinningsområdet användes i första hand tjäldjupet vid stationen GG (Granskog), eftersom ca 90 % av området är täckt av skog. Tjäldjupsbestämningen med hjälp av gipsblocken är osäkrare under slutet av tjälperioden då marken innehåller ökande mängd fritt vatten. Som komplement till tjäldjupsmätningarna interpolerades därför ett alternativt tjäldjup fram som nollgraders-isotermen ur marktemperaturdata (Figur 12). De två data är dock inte helt oberoende av varandra eftersom mätningarna med gipsblock också har stämts av mot marktemperaturerna. Eftersom tjäldjupsdata avser perioder då marken varit huvudsakligen tjälad ligger marktemperaturen nära markytan vid 0 grader under en längre period (Figur 13), under vilken det kan ha funnits en blandning av is och vatten i marken.



Figur 12. Jämförelse mellan tjäldjupet uppmätt med gipsblock (heldragen kurva) och interpolerat ur marktemperaturdata (streckad kurva) för stationen Granskog. Data från Svartbergets försökspark.

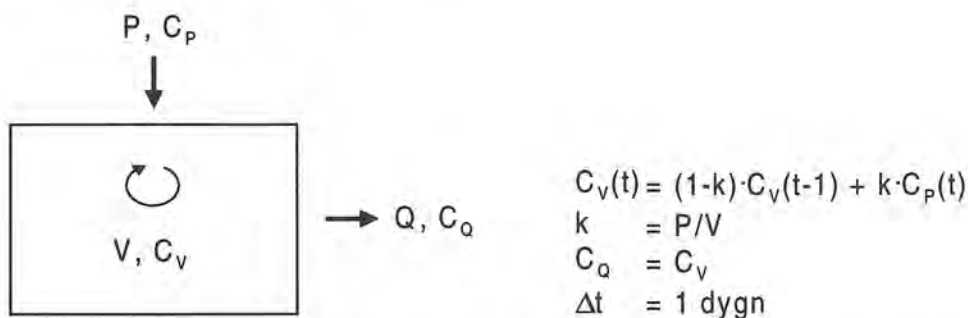


Figur 13. Uppmätt snödjup, marktemperatur och tjäldjup enl. gipsblocken från stationen Granskog. Data från Svartbergets försökspark.

4.3 Tjäldjup och flödesvägar

Mätningar av den konservativa syreisotopen ^{18}O i nederbörd och bäckvatten fanns tillgängliga för ca fyra år. En enkel blandningsmodell sattes upp (Figur 14), med vars hjälp ^{18}O -halten i bäcken, C_0 , beräknades ur ^{18}O -halten, C_P , i infiltrationen. Infiltrationen, P beräknades med HBV-modellen som summan av regn och snösmältning (variabeln *insoil*). Volymen, V , med vilken infiltrerande vatten blandades i marken, antogs konstant över varje vårflod, dvs

avrinningen $Q = P$. Ett bästa värde på V uppskattades för varje vårflod (1 april - 31 maj, så länge det fanns snö), som det värde som gav bäst överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt ^{18}O -halt. Som startvärde på C_V sattes ^{18}O -halten i bäcken inför varje vårflod. Hypotesen var att infiltrerande vatten skulle blandas med en mindre volym mark- och grundvatten om marken var tjälad.



Figur 14. Blandningsmodell för beräkning av ^{18}O -halt i bäckvattnet, C_Q , utifrån halten i infiltration, C_P , och blandningsvolymen V .

4.4 Modellering av tjäldjupet

4.4.1 Modellbeskrivning

Sandén (1992) visade att det går att simulera marktemperatur med förvånansvärt enkla medel. Han lade in en mycket enkel rutin i PULS-modellen, en variant av HBV-modellen. Ingenjörer har också en lång tradition av att beräkna tjäldjup mha ackumulerade negativa graddagar (se t.ex. Maidment, 1992). Intern kontroll av hydrologiska modeller, som komplement till att man endast studerar avrinningen, har även blivit aktuellt vid tillämpning av hydrologiska modeller i t.ex. klimatstudier (Bergström, m.fl., 1997).

HBV-modellen beräknar snötäckets ekvivalenta vatteninnehåll i mm. Normalt finns ingen beskrivning av snöns verkliga djup eftersom densiteten inte är känd. Snöns densitet, ρ , beräknades här enl.:

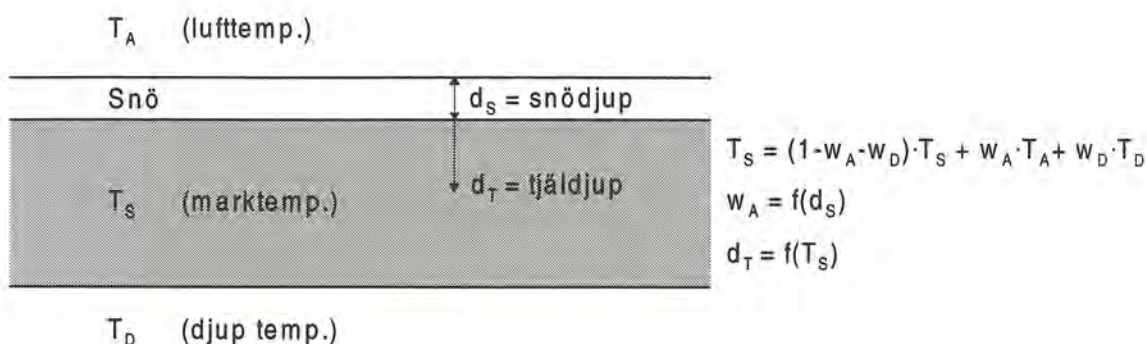
$$\rho = \rho_0 + c_A \cdot age$$

där ρ_0 är densiteten för nysnö, age är snöns medelålder och c_A en modellparameter. Snöns medelålder bestämdes dag för dag genom viktning (m.a.p. mängd) av den befintliga snöns medelålder med nysnön ($age = 0$). Ur densiteten och snöns vattenekvivalent bestämdes därefter snödjupet. Nord och Taesler (1973) genomförde en omfattande studie av snötäckens densitet och massa i Sverige. De kom fram till att snöns densitet ökar ungefär linjärt med tiden, vilket alltså är i linje med ekvationen ovan.

En marktemperatur, T_S , beräknades (se Figur 15) genom en utjämning av lufttemperaturen, T_A , samt ett litet tillskott av värme från djupare markskikt, med temperatur T_D :

$$T_S(t) = (1 - w_A - w_D) \cdot T_S(t-1) + w_A \cdot T_A(t) + w_D \cdot T_D.$$

Den sista termen representerar ett värmefflöde underifrån och T_D sattes konstant lika med medeltemperaturen på 1 m djup. Marktemperaturen T_S stämde tämligen väl överens med en ur mätningarna beräknad medeltemperatur för de översta 50 cm, utom då T_S var under 0 grader. Då T_S understiger 0 grader bör den betraktas som ett köld-index snarare än en marktemperatur. Köldindex av liknande typ används ofta vid modellering av tjäldjup (Maidment, 1992). Då temperaturen går under 0 grader frigörs värme när vattnet fryser till is. Den verkliga marktemperaturen är därför väsentligt högre än det modellberäknade T_S under denna period. R^2 -värdet mellan T_S och marktemperaturen för de översta 50 cm var 0.77, då perioder med negativa temperaturer undantogs, utan att marktemperaturen ingick direkt i kalibreringen.



Figur 15. Principskiss över beräkningen av tjäldjupet. Tidssteget = 1 dygn, T_D = konstant.

Snöns isolerande förmåga togs med i beräkningen genom att påverkan från lufttemperaturen minskade med ökande snödjup, d_s :

$$w_A(d_s) = \frac{1}{mem + k_s \cdot d_s}$$

där mem och k_s är modellparametrar. Parametern mem är ett minne som beskriver hur snabbt marktemperaturen ställer in sig efter lufttemperaturen. Tjäldjupet, d_T , bestämdes slutligen ur köld-indexet (då $T_S < 0$) och markfuktigheten enl.:

$$d_T = k_T \cdot \frac{FC}{SM} \cdot T_S$$

där FC = fältkapaciteten, SM = markfuktigheten och k_T är en parameter. Tjäldjupet ökar alltså med tjälindex. Tjälen blir också djupare i torr mark än i fuktig mark. Rutinen har fyra parametrar: mem , k_s , w_D och k_T . w_D sattes till 0.001 medan de övriga kalibrerades. Dessutom tillkommer parametrarna i snörutinen. Principerna för tjäldjupsberäkningen sammanfattas i Figur 15.

Snöns värmeledningsförmåga beror egentligen av densiteten. Ett flertal alternativa modellformuleringar testades, där hänsyn togs till snöns densitet, inverkan av infiltrerande smält-

vatten etc. Eftersom de inte fungerade bättre i praktiken valdes den ovan beskrivna enkla formuleringen. Ett grundvattendjup, d_G , beräknades dessutom i modellen enligt:

$$d_G = d_0 + \frac{UZ + LZ}{s}$$

där d_0 är en referensnivå, UZ och LZ är nivåerna i modellens responsrutin (Figur 10), och s är den effektiva porositeten. Liknande beräkning av grundvattennivån i PULS-modellen har gjorts av t.ex. Bergström och Sandberg (1983) och Bergström m.fl. (1990). Till skillnad från i tidigare studier utnyttjades här summan av UZ och LZ som ett mått på det totala grundvattenmagasinet i området. Den beräknade grundvattennivån jämfördes sedan med det ovan beräknade medelvärdet av observationerna (Figur 2).

Som ett försök till att förbättra beräkningen av snösmältningen i HBV-modellen gjordes tester i vilka både lufttemperaturen och marktemperaturen antogs påverka snösmältningen enligt:

$$melt = cfmax_A \cdot (T_A - TT) + cfmax_S \cdot T_S.$$

På detta sätt skulle modellen kunna beskriva att nysnö på varm mark smälter bort medan snö på kallt underlag kan ligga kvar längre.

4.4.2 Samtidig kalibrering

En metod för samtidig kalibrering testades för att få modellen att samtidigt beskriva flera variabler så korrekt som möjligt. Modellens parametrar kalibrerades genom optimering av ett viktat kriterium:

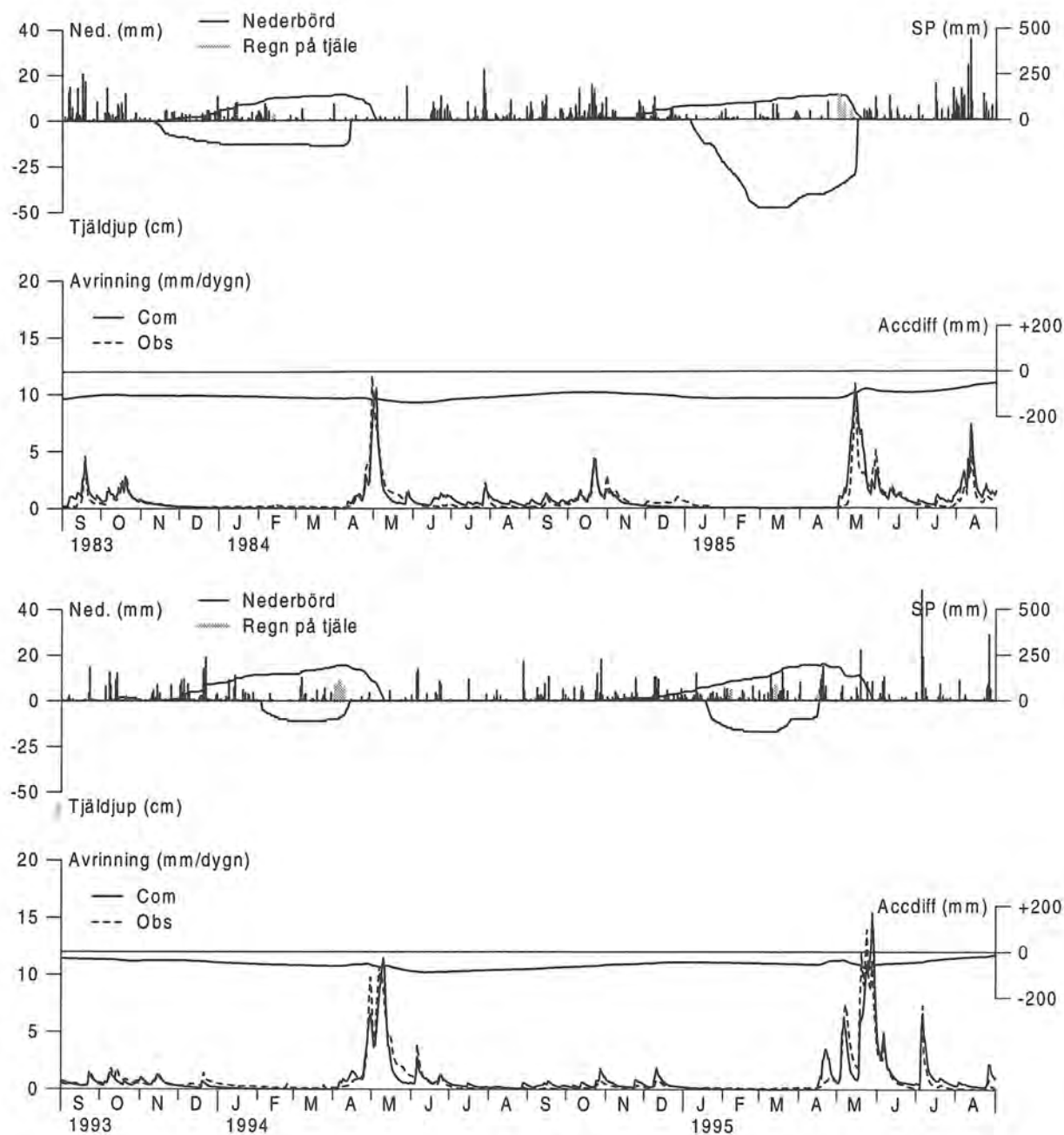
$$Optimeringskriter. = c_1 \cdot R^2_Q + c_2 \cdot R^2_{SNÖDJUP} + c_3 \cdot R^2_{GRUNDV} + c_4 \cdot R^2_{TJÄLDJUP} - c_5 \cdot |volymfel|$$

Vid utvecklingen av modellen utnyttjades data från alla de 16 åren. För utvärdering kalibrerades därefter parametrarna för de tio åren 1980-09-01 till 1990-08-31, och perioden 1990-09-01 till 1996-08-31 utnyttjades som oberoende period. Vikterna c_1 till c_4 sattes = 1.0 och $c_5 = 0.3$.

5. RESULTAT

5.1 Avrinning och tjälförhållanden

HBV-modellen gav en överensstämmelse på 80 % för hela perioden, mätt med R^2 (Nash och Sutcliffe, 1970). Ett utdrag ur simuleringsperioden visas i Figur 16. I figuren markeras de få tillfällen med nämnvärt regn (enligt modellen) på tjälad mark som fanns i hela perioden. Som mest föll det 11 mm regn under någon dag då det samtidigt fanns tjäle (maj 1985, se Figur 16).



Figur 16. Utdrag ur HBV-simulerad avrinning, tillsammans med uppmätt tjåldjup (stationen GG). Regn under dagar med tjåle markeras med bredare grå stapel, övrig nederbörd med tunn svart stapel.

Inga uppenbara samband mellan hur väl HBV-modellen beskrev vårflödena och tjålförhållandena under vintern kunde ses (Figur 17). En svag tendens finns till att flödena överskattas något under år med djup tjåle. Å andra sidan var det bara djup tjåle under tre år. Tendensen går dessutom åt motsatt håll mot vad som är den vanligaste uppfattningen, nämligen att tjåle, om något, skulle innebära en snabbare, ytligare och större, avrinning.

Om man studerar förhållandena mer i detalj ser man det är ganska ovanligt med kvarvarande tjåle under vårfloden (Figur 18). Trots att det var minusgrader fram till mitten av april 1989 så tinade tjålen bort. Samma fenomen förekom även vissa andra år. Eftersom snötäcket inte kan

vara varmare än 0° torde upptinandet bero på värmefflöde ifrån underliggande varmare mark som har värmts upp under sommar och höst (Figur 18).

Sett över alla åren så var det bara ett år (våren 1985) då det inträffade någon nämnvärd vårflood medan det enligt mätningarna fanns kvar tjäle (Figur 19 t.h.). Den mesta av tiden då det fanns tjäle var dock vattenföringen låg. Vid de flesta tillfällena med hög avrinning skulle alltså tjälen redan vara borta. De få punkterna (härrörande från våren 1985) som finns med samtidigt flöde och tjäle ligger även de, såsom ovan, på fel sida om 1:1-linjen, om hypotesen är att tjäle leder till snabbare avrinning. Även under 1996 sammanföll snösmältningen med att marken var tjälad. Den djupa tjälen det året var dock till stor del en effekt av det ovanligt tunna snötäcket. När snön smälte 1996 erhöles knappast någon vårflood alls. Inte heller syns någon markant skillnad mellan snösmältningsperioder då det funnits tjäle någon gång under vintern och helt tjälfria vintrar (Figur 19 t.v.).

Eftersom det finns så få tillfällen av samtidigt flöde och tjäle så är det svårt att kalibrera modellen separat för tjälade respektive otjälade förhållanden. Detta kunde annars ha varit ett kompletterande sätt att studera tjälens inverkan på avrinningen.

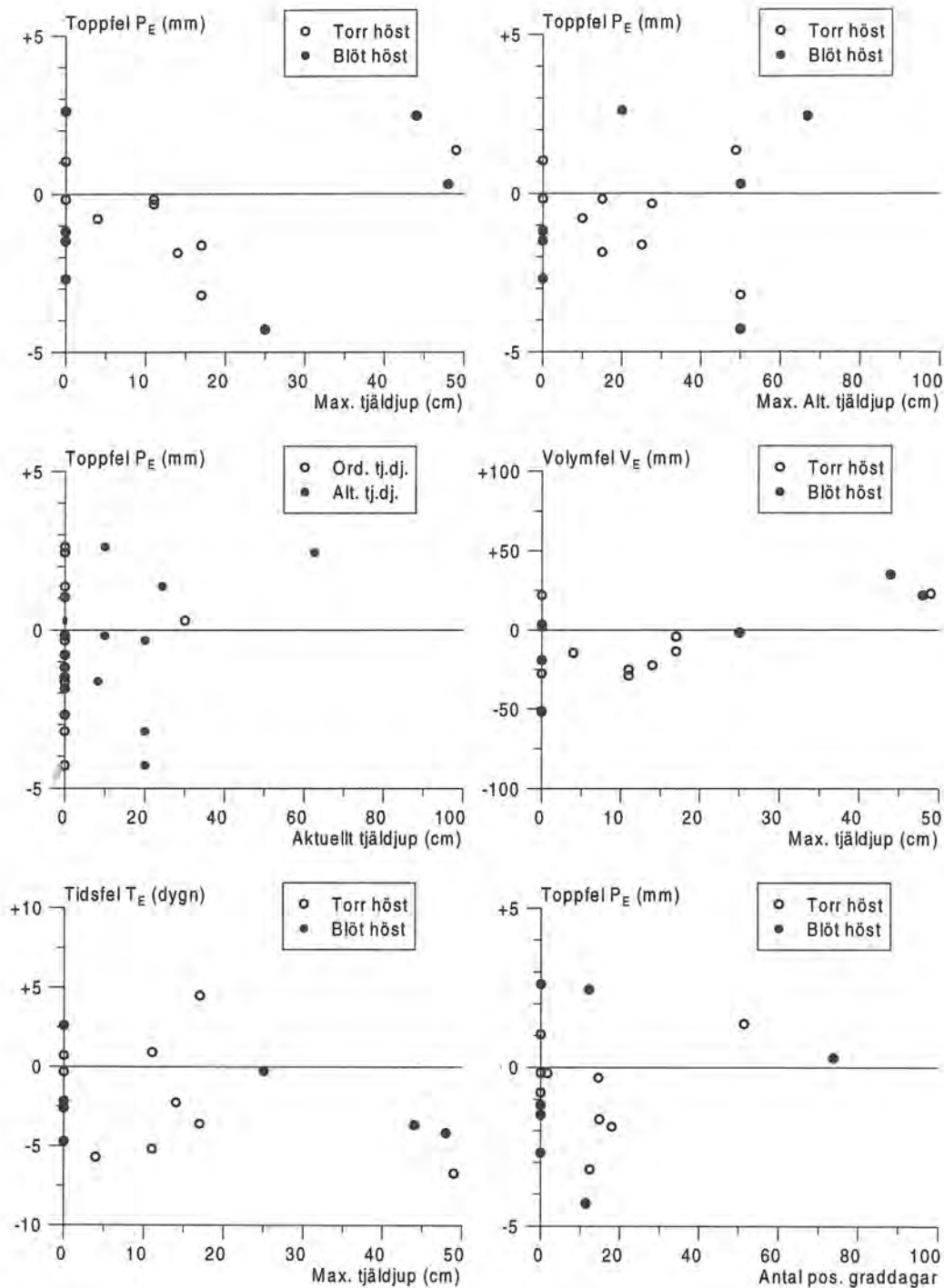
De flesta av jämförelserna bygger på de ordinarie tjäldjupsmätningarna, vilka som tidigare nämnts är osäkra under upptiningsfasen. Emellertid gav inte jämförelser baserade på de alternativa tjäldjupen, uppskattade ur marktemperaturdata, några motsägende resultat, även om bilden då inte blir lika klar eftersom den period som bedöms som tjälad blir längre.

Figur 20 visar den uppskattade blandningsvolymen, dvs mängden tillgängligt mark- och grundvatten som infiltrerande regn och smältvatten blandas med, beräknat med ¹⁸O-data. Hypotesen om att blandningsvolymen skulle vara mindre under år med tjäle kan knappast sägas vara styrkt. Förutom för våren 1989, då ingen blandningsvolym kunde beräknas, erhöles t.ex. störst blandningsvolym för våren 1987, då tjälen var ovanligt djup, dvs tvärtemot det förväntade. En blandningsvolym på i medeltal ca 200 mm (Figur 20) och en årsavrinning på ca 300 mm ger en omsättningstid på drygt ett halvår för de flödesförhållanden som råder under vårfloodesperioderna.

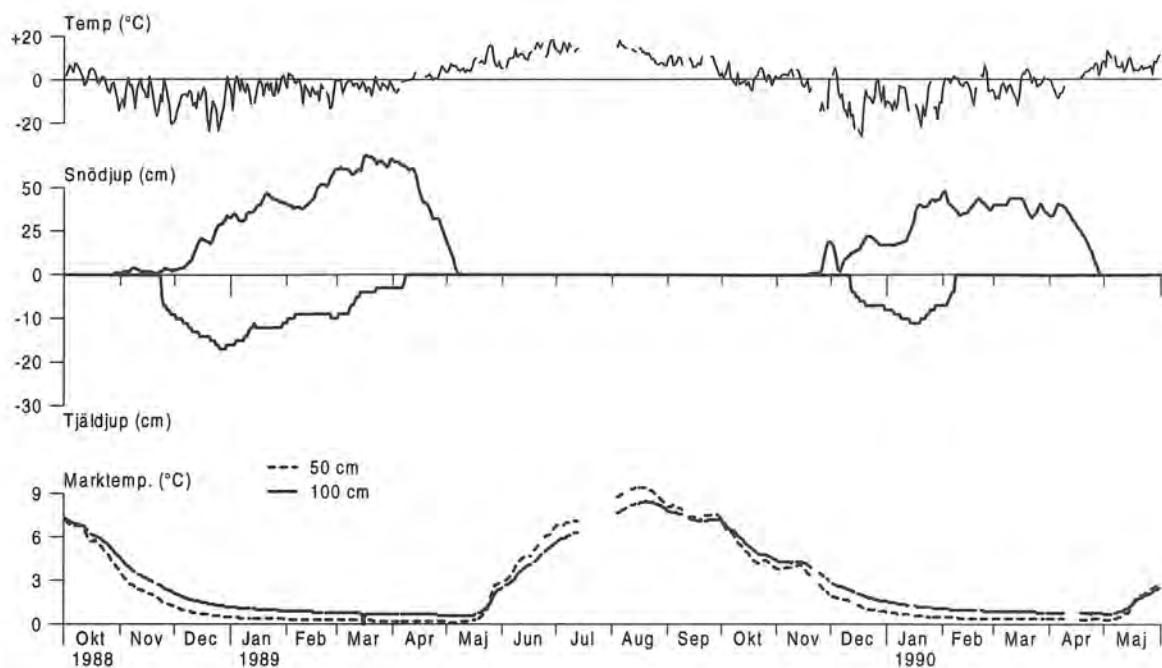
5.2 Modellering av tjäldjupet

På grund av det stora antalet parametrar och variabler som skulle fås att överensstämja blev den samtida kalibreringen inte helt enkel. Resultatet var känsligt för val av startvärden i optimeringen. Exempel på simuleringar visas i Figurerna 21 och i mer detalj i Figur 22. Tjälmodellen fungerade ganska väl trots sin enkelhet, och klarade t.ex. att avgöra ifall marken tjälades eller ej alla vintrar utom en. Snödjupet stämde också förvånansvärt bra. Anpassningen i vattenföring blev något sämre då kalibreringen gjordes över alla variablerna samtidigt. Då modellen kalibrerades för en variabel i taget erhöles bättre anpassning för respektive variabel (Tabell 2). De övriga variablerna stämde naturligtvis mycket sämre i dessa fall.

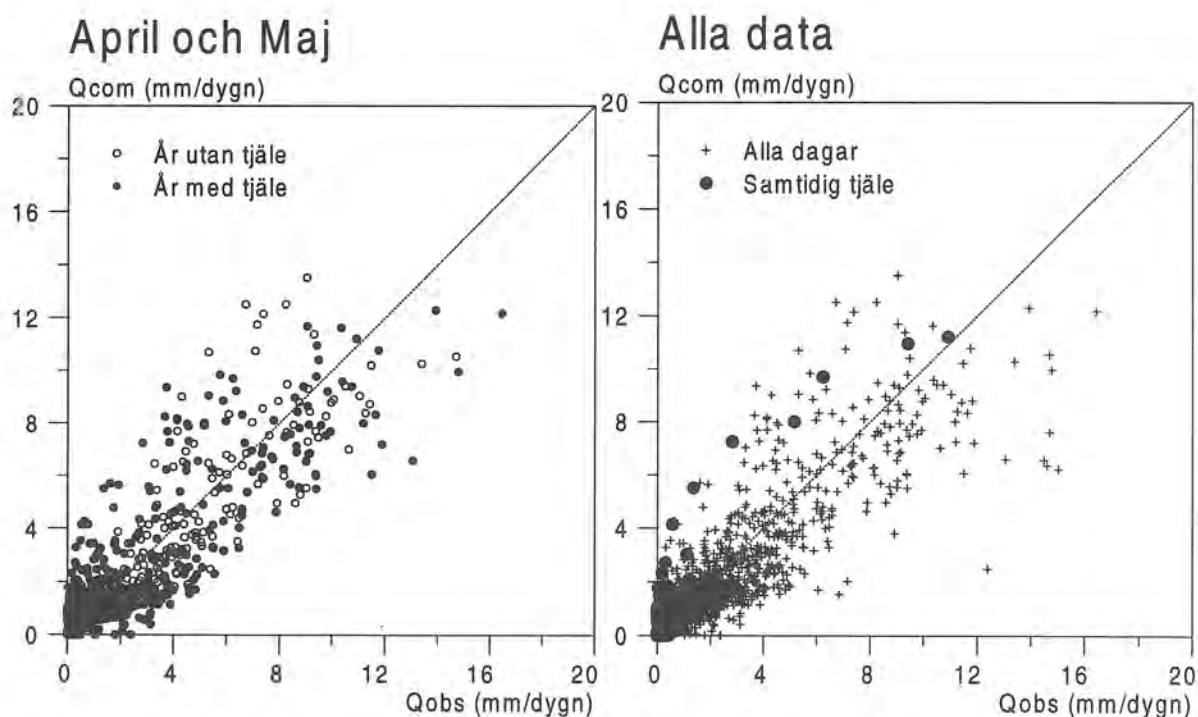
Svartberget 1981-1996 April och maj



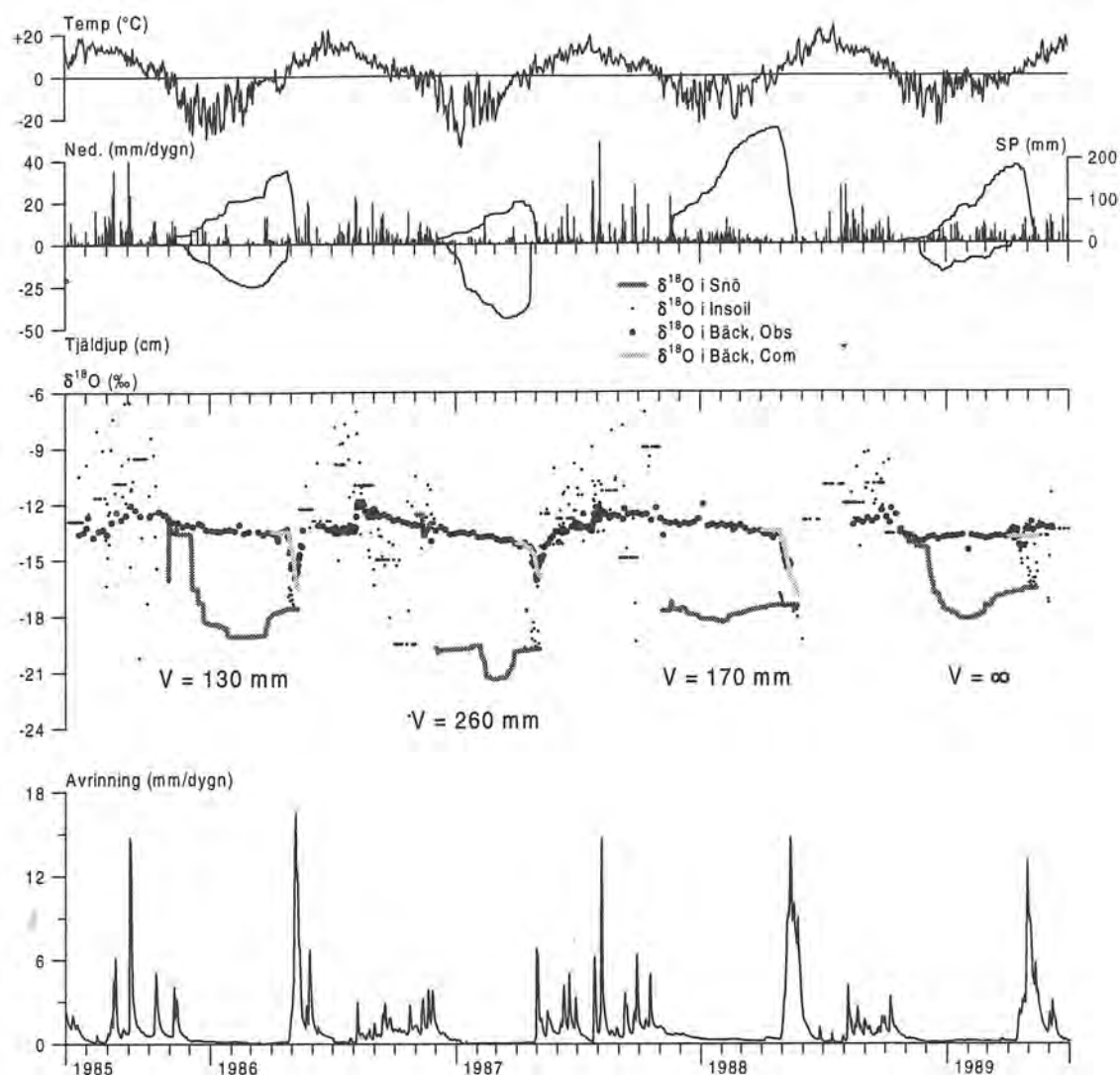
Figur 17. Anpassningsmått för HBV-modellen över vårflödesperioden 1 april – 31 maj mot olika sätt att mäta tjälförhållandena i granskogen. Det ordinarie tjäldjupet avser mätningarna med gipsblock och det alternativa tjäldjupet (Alt. tj. dj.) är det ur marktemperaturerna beräknade djupet. Max. tjäldjup avser det största tjäldjupet under vintern och aktuellt tjäldjup avser det tjäldjup som råder under den aktuella dagen. De föregående höstarna har indelats i två kategorier (torr och blöt) baserat på medelavrinningen i november. Antalet positiva graddagar räknades under den tjälade perioden.



Figur 18. Exempel på upptining av tjålen vid stationen Granskog. Alla variabler är uppmått, tjåldjup enligt gipsblocken. Data från Svartergets försökspark.



Figur 19. HBV-modellens beråknade flåde (Q_{com}) mot uppmått flåde (Q_{obs}) får alla dagar i april och maj, uppdelade efter om det någon gång under vintern varit tjåle eller inte (t.v.), och får alla dagarna i hela beråkningsperioden (+) och de dagar då man samtidigt haft tjåle (fylld cirkel) (t.h.), stationen Granskog.

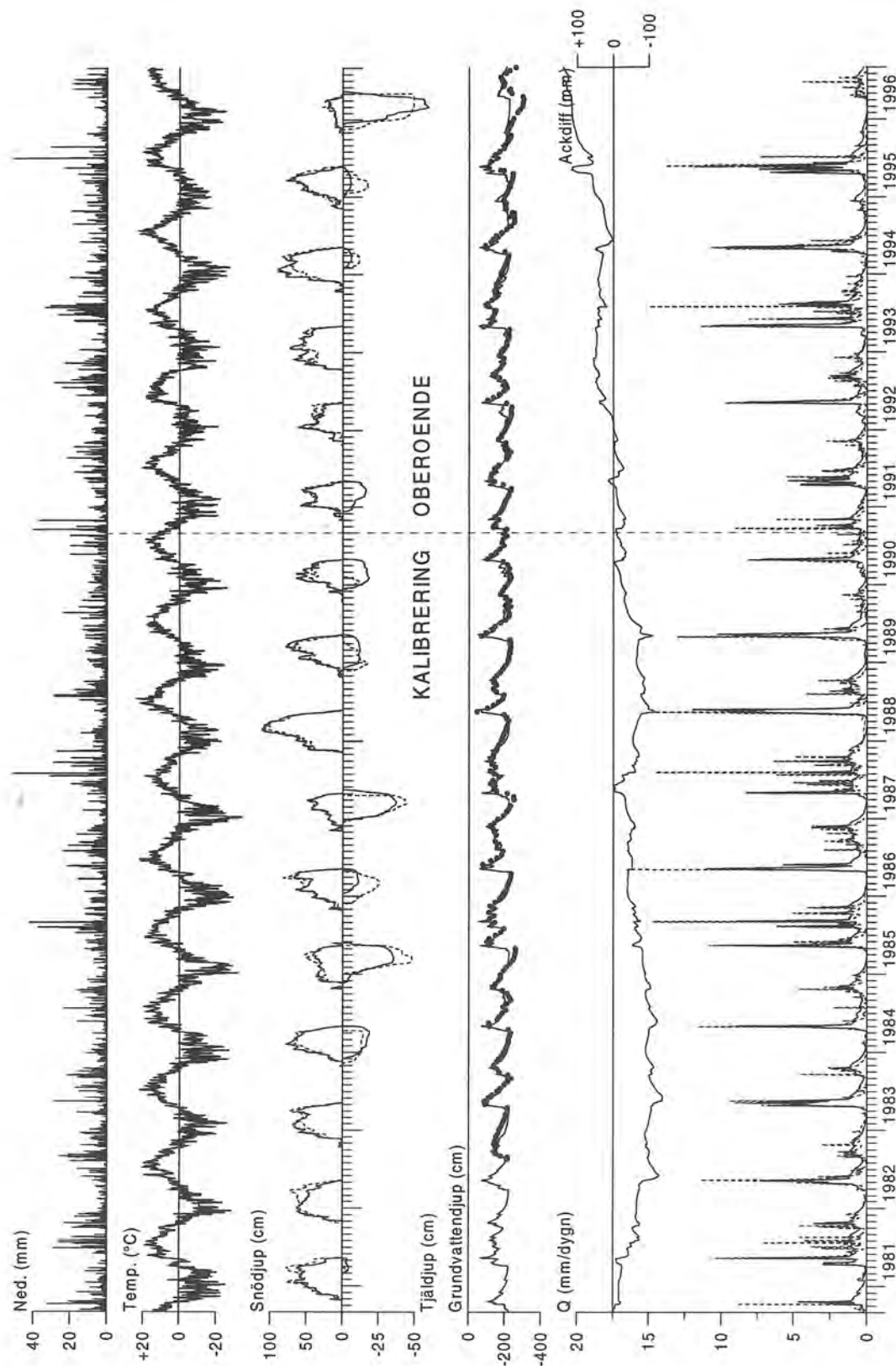


Figur 20. Simulering av ^{18}O -halt i bäckvattnet (Com) jämfört med mätningar (Obs). Uppskattade blandningsvolymen, V , anges för respektive vårflod. ^{18}O -data från Allan Rodhe, Uppsala Universitet och Kevin Bishop, SLU.

Tabell 2. R^2 -värden för de olika variablerna, kalibrerat över hela dataperioden. Samtidig = samtidig kalibrering av alla variablerna. Individuell = kalibrering med avseende på endast den aktuella variabeln. Snödjup och tjöldjup avser stationen GG.

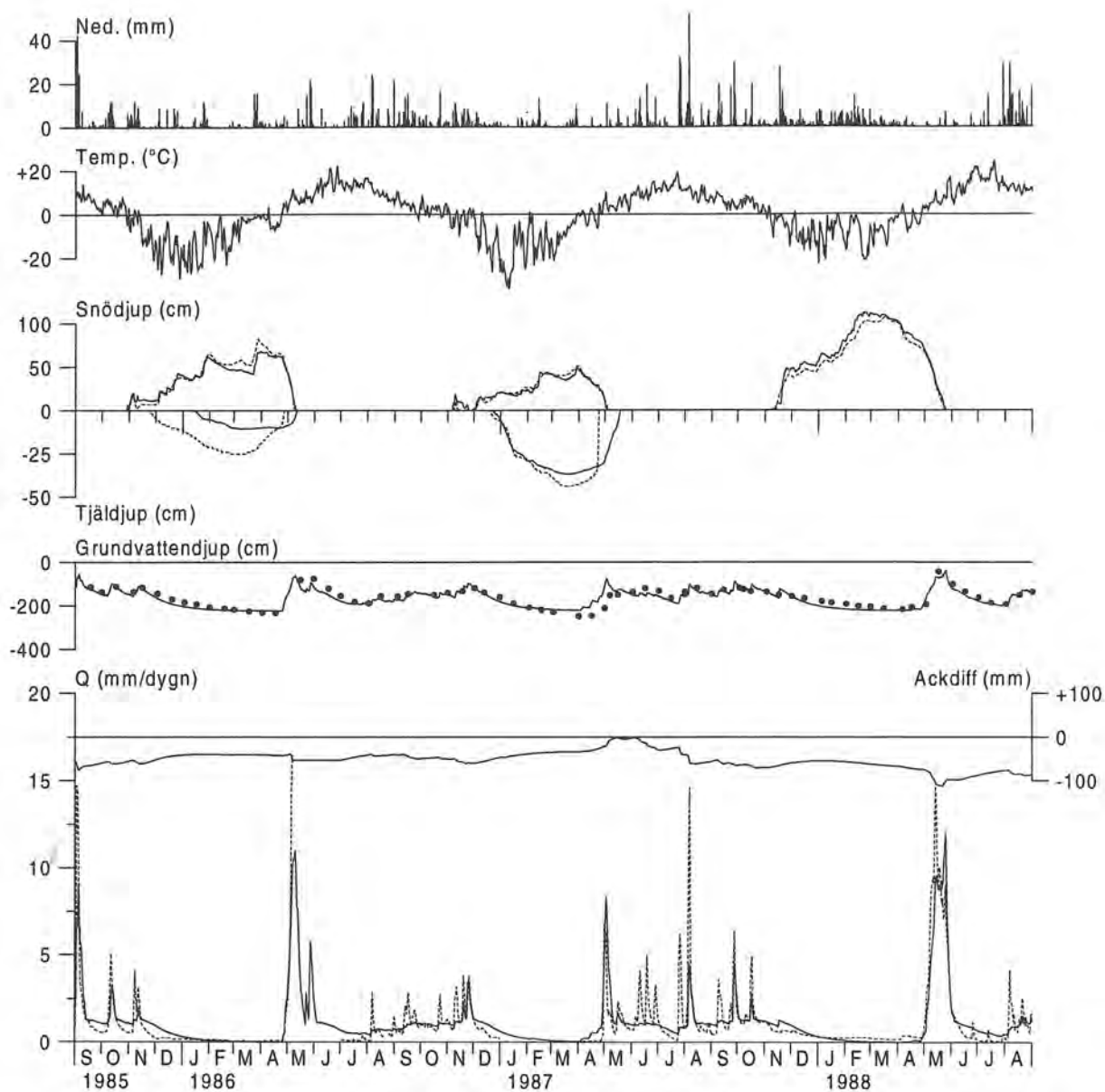
Variabel:	Vattenföring	Snödjup	Tjöldjup	Grundvatten
Samtidig kal.	0.753	0.945	0.756	0.767
Individuell kal.	0.796	0.958	0.886	0.832

Den beräknade vattenföringen blev inte bättre i de tester som gjordes då snösmältningen i modellen fick påverkas av både lufttemperaturen och marktemperaturen. Denna erfarenhet stämmer med vad t.ex. Bras (1990) skriver om att markvärmeflödet har ganska liten inverkan på snösmältningen.



Figur 21.

Simulering av snödjup (stationen GG), tjåldjup (GG), grundvattendjup (medel) och avrinning för Svartberget. $R^2_Q = 0.74$, $R^2_{SNÖDJUP} = 0.94$, $R^2_{TJÅLDJUP} = 0.78$, $R^2_{GRUNDV} = 0.66$, över hela perioden. Uppmätt snödjup, tjåldjup och vattenförling med streckad kurva, uppmätt grundvattennivå med fyllda cirklar.



Figur 22. Simulering av snödjup (stationen GG), tjåldjup (GG), grundvattendjup (medel) och avrinning för Svartberget, tre år i kalibreringsperioden. Uppmätt snödjup, tjåldjup och vattenföring med streckad kurva, uppmätt grundvattennivå med fyllda cirklar.

Parametrarna i HBV-modellens snörutin kalibrerades även direkt mot snödata från de tre mätplatserna Hed, Hygge och Granskog. Hela perioden användes därvid, och som kriterium användes medelvärde av R^2 för snöns djup, densitet och vattenekvivalent. De olika snöförhållandena mellan skog och öppen mark kan ses i en större snöackumulation, men snabbare avsmältning, på öppen mark än i skogen (Figur 23 samt Figur 9). Detta avspeglas också i erhållna parametervärden (Tabell 3). Snösmältningshastigheten $CFMAX$ stämmer väl med de standardvärden som används på SMHI för skog (2.0) och öppen mark (3.5). Tabellen illustrerar problemet med de låga snöfallskorrekationer som man ibland tvingas använda för skog. Ett riktigare värde är troligen ca 1.2 (se t.ex. Eriksson, 1983 eller Carlsson, 1985).

Tabell 3. Parametrar i HBV-modellens snörutin efter kalibrering mot snödata från de 3 stationerna i Svarberget. $PCORR = 1.1$ i samtliga körningar.

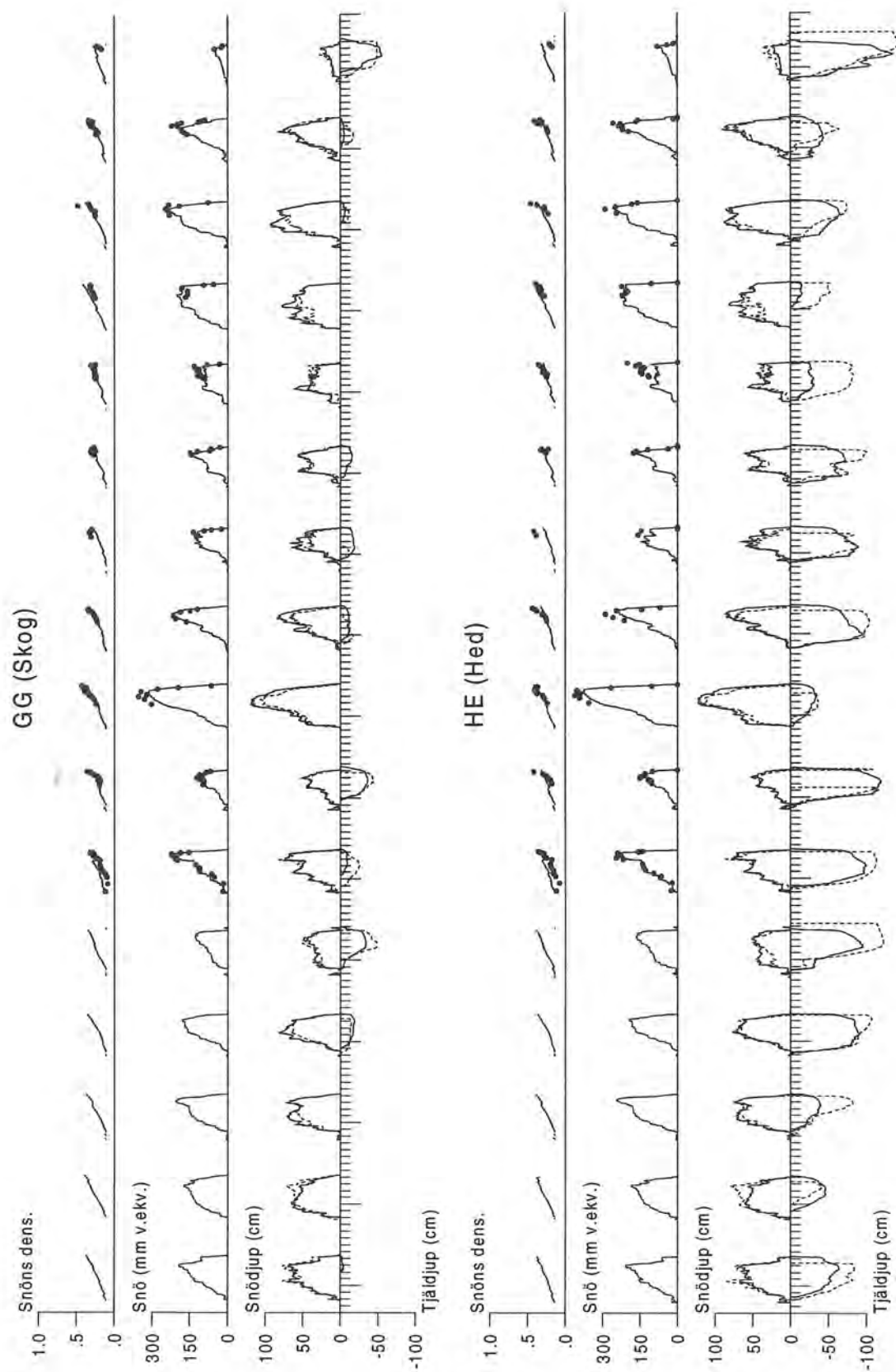
Parameter	GG Gammal Granskog	HE Hed	HY Hygge
$SFCF$	0.94	1.09	1.09
$CFMAX$	2.1	3.6	3.8
TT	-0.1	0.0	0.3

Parametrarna i snörutinen samt tjälrutinen kalibrerades sedan för de tre mätplatserna. Hela perioden användes, och som kriterium användes medelvärde av R^2 för snöns djup, densitet och vattenekvivalent samt tjäldjupet. De parametervärden som erhöles sammanfattas i Tabell 4. Värdena skall ses som mycket ungefärliga eftersom slutresultaten berodde på val av startvärde i optimeringen. Exempel på överensstämmelse kan ses i Figur 23.

Tabell 4. Parametervärden erhållna vid kalibreringen, parametrar som normalt inte ingår i HBV-modellen. ¹⁾ kalibrerades ej.

Parameter	Innebörd	Värde			Enhet
		GG	HE	HY	
ρ_0	Densitet för nysnö	0.10	0.14	0.12	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
c_A	Densitetsökning med tiden	0.002	0.002	0.002	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{dygn}^{-1}$
mem	Tidskonstant för marktemp.	31	12	26	dygn
k_S	Snötäckets isolerande förmåga	10	3	10	$\text{dygn}\cdot\text{cm}^{-1}$
w_D	Värmefflöde underifrån ¹⁾	0.001	0.001	0.001	dygn^{-1}
k_T	Tjäldjup per grad köld-index	10	12	15	$\text{cm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$

Att dra nytta av nya typer av data i HBV-modellen kan vara värdefullt då man vill förbättra modellen. Då modellen kalibreras mot flera variabler samtidigt borde man förhoppningsvis också få mer realistiska värden på parametrarna. Det var emellertid svårt att se att man fick mer stabila värden på t.ex. KO och $UZLO$ då kalibreringen utnyttjade även snödjupet, än då endast vattenföringen utnyttjades. Inte heller blev vattenföringen, över en oberoende period om sex år, särskilt mycket bättre efter kalibrering mot vattenföring och snödjup för 5 olika tvåårsperioder, än då endast vattenföring användes i kalibreringen.



Figur 23. Simulering av snöförhållanden och tjåldjup i Svartberget, stationerna GG (gammal granskog) och HE (Hed), (heldragna kurvor = beräkningar, streckade kurvor och fyllda cirklar = mätningar).

5.3 Uppdatering av snötäcket

Uppdatering av HBV-modellens snötäcke mot mätningar skulle kunna vara av stort värde inför vårflödesprognoser. Till skillnad från i normala tillämpningar anpassas modellens snötäcke till att vara direkt jämförbart med det uppmätta redan genom den samtidiga kalibreringen. Med hjälp av de uppmätta snödjupen, *snowobs*, testades därför en uppdatering av det modellberäknade snötäcket, *snowcom*:

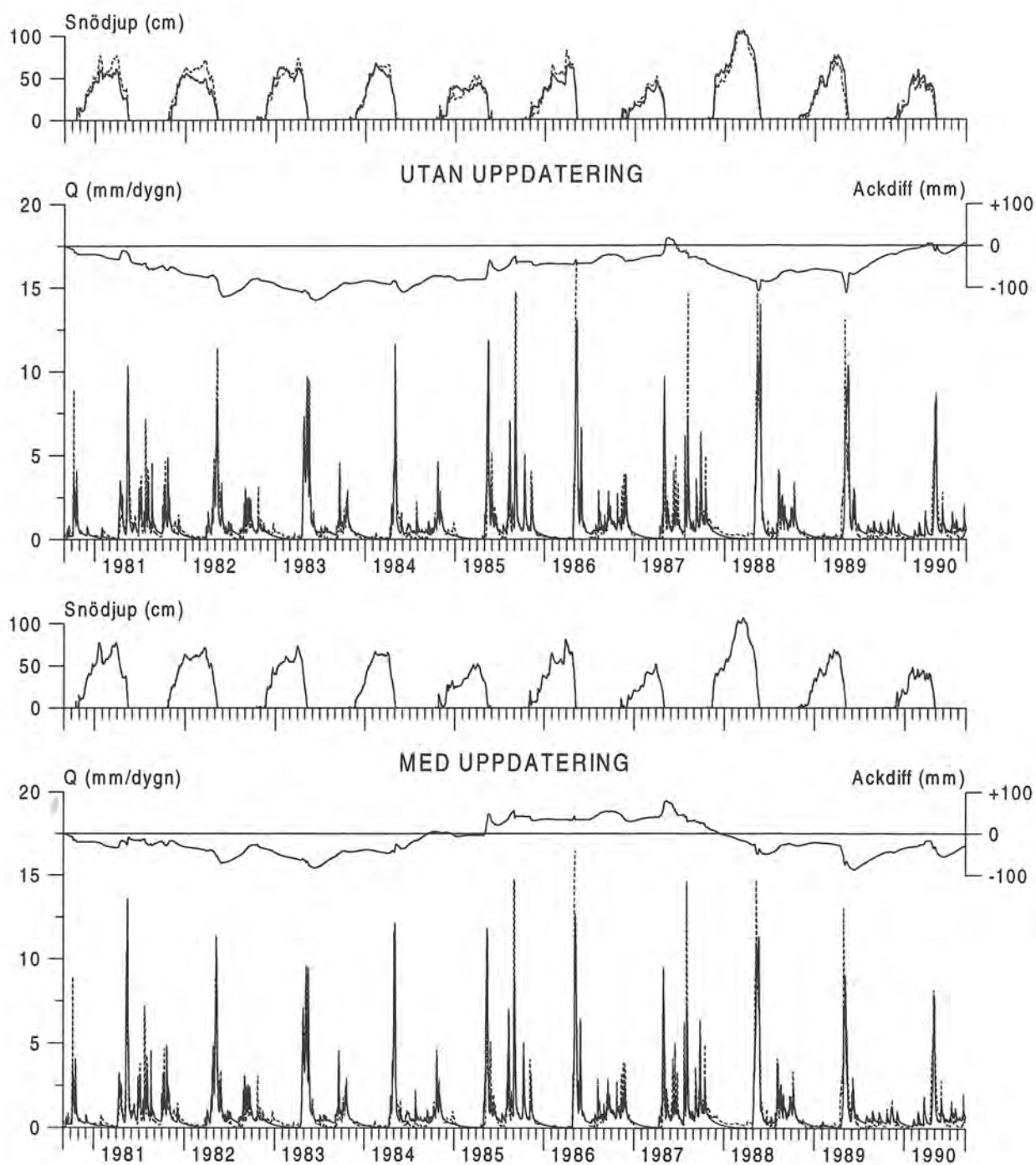
$$snowcom = (1-\alpha) \cdot snowcom + \alpha \cdot snowobs$$

där α är en följsamhetsparameter mellan 0 och 1. Här användes $\alpha = 0.5$. Som optimeringskriterium användes vattenföring och snödjup, vilket gav en nästan lika god anpassning för vattenföringen ($R^2 = 0.793$) som då endast vattenföring ingick i kalibreringen ($R^2 = 0.796$). Som helhet erhöles något bättre resultat då modellens beräknade snötäcke uppdaterades mha snödjupsmätningarna (Tabell 5). Metoden och resultat illustreras även i Figur 24. Bättre resultat erhöles då uppmätt snödjup användes för uppdatering än då snötaxeringarna användes, troligen beroende på att snödjupsmätningar har gjorts oftare. Främsta nyttan av snödjupsmätningarna bör vara under slutfasen av vårfloden, då man skulle kunna rätta till år då snön antingen har tagit slut för tidigt, eller ligger kvar för länge, i modellen.

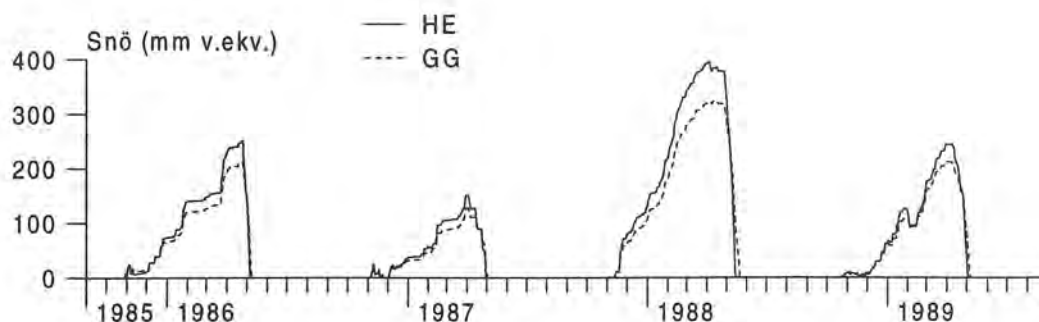
Tabell 5. Resultat av uppdatering mot snödjupsmätningar i Svarthöret, för kalibreringsperioden 1980-09-01 - 1990-08-31.

Kriterium	Utan uppdat.	Med uppdat.
R^2_Q , hela perioden	0.793	0.810
R^2_Q , april och maj	0.752	0.788

Uppdateringen utnyttjades också till en studie av skillnaderna i snöförhållandena mellan skog och öppen mark. Snödjupet uppdaterades såsom beskrivits ovan, varje dag, medan snöns densitet uppdaterades på motsvarande sätt för de dagar då sådana observationer fanns. Därur beräknades ett värde på snötäckets vatteninnehåll. Figur 25 visar en jämförelse mellan stationerna HE (hed) och GG (gammal granskog). Snöförhållandena följer varandra väl i tiden, men på en något högre nivå på den öppna marken. Man ser alltså inga uppenbara exempel på att snön skulle fastna i träden som interception och sedan dräsa ner. I genomsnitt ligger det ca 30 mm mer snö på de två öppna ytorna än i skogen då snötäckena kulminerar. Avsmältningen är något långsammare i skogen.



Figur 24. Exempel på simulering för Svartberget utan respektive med uppdatering av modellens snödjup mot mätningar. Streckade kurvor = mätningar, heldragna kurvor = beräkningar.



Figur 25. Snötäckets vatteninnehåll vid stationerna HE (hed) och GG (granskog) i Svartberget, efter uppdatering av modellens snödjup och densitet mot mätningar.

6. SLUTSATSER

Det finns åtskilliga studier som redovisar en effekt av tjäle på avrinningen i jordbruksmark. Förhållandena för skogsmark är mindre kända. De två öppet belägna mätplatserna i Svartberget uppvisar också mycket djupare och mer långvarig tjäle, än mätplatsen i gammal granskog. Det studerade avrinningsområdet, till 90 % täckt av skog, bör vara ganska representativt för stora delar av Norrlands inland. Följande slutsatser drogs:

- Ingen tydlig inverkan av tjälen på avrinningen från skogsmark kunde påvisas.
- Marken under skogen tjälas bara ungefär vartannat år, och tjälen tinar dessutom ofta bort innan snösmältningen kommer igång på allvar.
- De flesta vårflödena inträffar då marken under skogen är otjälad. Om tjälen skulle ha någon inverkan så spelar det mindre roll eftersom det så få vintrar finns kvar tjäle när vårfloden kulminerar.
- Vintar med djup tjäle är ofta ganska snöfattiga. Om de måttliga flöden som uppstår då denna snö smälter påverkas eller ej har liten betydelse för uppkomsten av översvämningar.
- Tjældjupet kunde beräknas någorlunda noggrant med en enkel modell som i första hand styrs av en utjämnad lufttemperatur.
- En enkel rutin för beräkning av snöns densitet fungerade tillfredställande. Med denna rutin kunde snödjupet beräknas, vilket skulle göra det möjligt att uppdatera HBV-modellen mha snödjupsmätningar.
- Modellen kunde fås att stämma ganska bra överens med uppmätta värden på snödjup, grundvatten, tjældjup och vattenföring samtidigt, efter samtidig kalibrering mot dessa variabler.

7. REFERENSER

Andersson, L. (1989) Ecohydrological water flow analysis of a Swedish landscape in a 100 year perspective. Doctoral Dissertation, Linköping Studies in Arts and Science, No. 33, ISBN 91-7870-431-6, ISSN 0282-9800.

Arnér, E. (1991) Simulering av vårflöden med HBV-modellen. SMHI Hydrologi Nr. 32, Norrköping.

Bengtsson, L., Seuna, P., Lepistö, A. och Saxena, R. (1992) Particle movement of melt water in a subdrained agricultural basin. *Journal of Hydrology*, 135, 383-398.

Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI RHO 7, Norrköping.

Bergström, S. (1995) The HBV Model. In V.P. Singh (Ed.) *Computer models of watershed hydrology*, 443-476, Water Resources Publications, Highland Ranch, Colorado, USA.

Bergström, S., Lindström, G., Graham, L.P. och Jacob, D. (1997) Conceptual hydrological modelling of the overall water balance of the Baltic basin - the HBV approach. Bidrag till "Baltex-SSG hydrological workshop", Riga, Lettland, April 1997.

Bergström, S. och Sandberg, G. (1983) Simulation of groundwater response by conceptual models - Three case studies. *Nordic Hydrology*, Vol. 14, 71-84.

Bergström, S., Sandén, P. och Gardelin, M. (1990) Analysis of climate-induced hydrochemical variations in till aquifers. SMHI Report RHO No. 1.

Bishop, K. H. (1991) Episodic increases in stream acidity, catchment flow pathways and hydrograph separation. Doctoral Dissertation, University of Cambridge, U.K., ISSN 0280-9168.

Bishop, K. H. (1994) Return flow in till hillslopes: Final report of a project funded by The Swedish Geological Survey. Swedish Univ. of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Ecology, Report Series No. 25, 36 pp.

Brandt, M., Bergström, S., Gardelin, M. och Lindström, G. (1987) Modellberäkning av extrem effektiv nederbörd. SMHI Hydrologi Nr. 14, Norrköping.

Bras, R. L. (1990) *Hydrology - An Introduction to Hydrologic Science*. Addison Wesley Publishing Company.

Carlsson, B. (1985) Vindförluster vid mätning av snönederbörd med SMHI-nederbördsjäkaren. SMHI Rapport HO 25, Norrköping.

Engelmark, H. (1984) Infiltration in Unsaturated Frozen Soil. *Nordic Hydrology*, Vol. 15, 243-252.

Eriksson, B. (1983) Data rörande Sveriges nederbördsclimat. Normalvärden för perioden 1951-80. SMHI Rapporter Mk 1983:28, Norrköping.

Fox, J.D. (1992) Incorporating freeze-thaw calculations into a water balance model. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 9, 2229-2244.

Grip, H. och Rodhe, A. (1985) Vattnets väg från regn till bäck. Forskningsrådets Förlagstjänst. ISBN 91-86344-17-X.

Häggström, M. och Sahlberg, J. (1993) Analys av snösmältningsförlopp. SMHI Hydrologi Nr. 44, Norrköping.

Häggström, M. (1994) Snökartering i svenska fjällområden med NOAA-satellitbilder. SMHI Hydrologi Nr. 57, Norrköping.

Jansson, P.-E. och Gustafson, A. (1987) Simulation of Surface Runoff and Pipe Discharge from an Agricultural Soil in Northern Sweden. *Nordic Hydrology*, 18, 151-166.

Johansson, B., Edström, M., Losjö, K. och Bergström, S. (1998) Analys och beräkning av snösmältningsförlopp. SMHI Hydrologi Nr. 75, Norrköping.

Johnsson, H. och Lundin, L.C. (1991) Surface runoff and soil water percolation as affected by snow and soil frost. *Journal of Hydrology*, 122, 141-159.

Lindström, G. (1997) A Simple Automatic Calibration Routine for the HBV Model. *Nordic Hydrology*, Vol. 28, 153-168.

Lindström, G., Gardelin, M., Johansson, B., Persson, M. och Bergström, S. (1996) HBV-96 - En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologin, SMHI RH 12, Norrköping.

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

Lindström, G., och Rodhe, A. (1986) Modelling water exchange and transit times in till basins using oxygen-18. *Nordic Hydrology*, Vol. 17, 325-334.

Lindström, G., Rodhe, A., och de Man, B. (1990) Transit times for water in till basins estimated by a distributed model and oxygen-18. Contribution to the XVI Nordic Hydrological Conference in Kalmar, July 29-August 1, 1990, 94-103.

Lundin, L.C. (1989) Water and heat flows in frozen soils, basic theory and operational modeling. Doctoral Dissertation at Uppsala University, 1989, ISBN 91-554-2342-8, ISSN 0282-7468.

Maidment, D.R. (1992) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York. ISBN 0-07-039732-5.

Nash, J.E., och Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.

Nord, M. och Taesler, R. (1973) Snötäckets densitet och massa i Sverige. Rapport R21:1973, Byggeforskningen, Svensk Byggtjänst, Stockholm, ISBN 91-540-2123-5.

Rodhe, A. (1987) The origin of streamwater traced by oxygen-18. Uppsala University, Department of Physical Geography, Division of Hydrology, Report Series A, No. 41, 260 pp + Appendix 73 pp.

Sand, K., och Kane, D. L. (1986) Effects of seasonally frozen grounds on snowmelt modeling. In Proceedings, Cold Regions Hydrology Symposium, edited by D. L. Kane, pp. 321-327, American Water Resources Assoc., Bethesda, Md., USA.

Sandén, P. (1992) Soil temperatures. In Sandén, P. and Warfvinge, P. (eds.), "Modelling groundwater response to acidification". SMHI RH 5, Norrköping.

Shanley, J.B. och Chalmers, A. (1999) The effect of frozen soil on snowmelt runoff at Sleepers River, Vermont. Hydrological Processes, 13, 1843-1857.

Sklash, M.G., och Farvolden, R.N. (1979) The role of groundwater in storm runoff. Journal of Hydrology, Vol. 43, 45-65.

Vehviläinen, B. (1992) Snow cover models in operational watershed forecasting. Publications of water and environment research institute No. 11. National board of waters and the environment, Helsinki, Finland.

SMHI ger ut sex rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationell publik och skrivs därför oftast på engelska. I de övriga serierna används det svenska språket.

Seriernas namn	Publiceras sedan
RMK (Rapport Meteorologi och Klimatologi)	1974
RH (Rapport Hydrologi)	1990
RO (Rapport Oceanografi)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985

I serien HYDROLOGI har tidigare utgivits:

- 1 Bengt Carlsson (1985)
Hydrokemiska data från de svenska fältforskningsområdena.
- 2 Martin Häggström och Magnus Persson (1986)
Utvärdering av 1985 års vårflödesprognoser.
- 3 Sten Bergström, Ulf Ehlin, SMHI, och Per-Eric Ohlsson, VASO (1986)
Riktlinjer och praxis vid dimensionering av utskov och dammar i USA. Rapport från en studieresa i oktober 1985.
- 4 Barbro Johansson, Erland Bergstrand och Torbjörn Jutman (1986)
Skåneprojektet - Hydrologisk och oceanografisk information för vattenplanering - Ett pilotprojekt.
- 5 Martin Häggström (1986)
Översiktlig sammanställning av den geografiska fördelningen av skador främst på dammar i samband med septemberflödet 1985.
- 6 Barbro Johansson (1986)
Vattenföringsberäkningar i Södermanlands län - ett försöksprojekt.
- 7 Maja Brandt (1986)
Areella snöstudier.
- 8 Bengt Carlsson, Sten Bergström, Maja Brandt och Göran Lindström (1987)
PULS-modellen: Struktur och tillämpningar.
- 9 Lennart Funkquist (1987)
Numerisk beräkning av vågor i kraftverksdammar.
- 10 Barbro Johansson, Magnus Persson, Enrique Aranibar and Robert Llobet (1987)
Application of the HBV model to Bolivian basins.
- 11 Cecilia Ambjörn, Enrique Aranibar and Roberto Llobet (1987)
Monthly streamflow simulation in Bolivian basins with a stochastic model.
- 12 Kurt Ehlert, Torbjörn Lindkvist och Todor Milanov (1987)
De svenska huvudvattendragens namn och mynningspunkter.
- 13 Göran Lindström (1987)
Analys av avrinningsserier för uppskattning av effektivt regn.
- 14 Maja Brandt, Sten Bergström, Marie Gardelin och Göran Lindström (1987)
Modellberäkning av extrem effektiv nederbörd.
- 15 Håkan Danielsson och Torbjörn Lindkvist (1987)
Sjökarte- och sjöuppgifter. Register 1987.
- 16 Martin Häggström och Magnus Persson (1987)
Utvärdering av 1986 års vårflödesprognoser.

- 17 Bertil Eriksson, Barbro Johansson, Katarina Losjö och Haldo Vedin (1987)
Skogsskador - klimat.
- 18 Maja Brandt (1987)
Bestämning av optimalt klimatstationsnät för hydrologiska prognoser.
- 19 Martin Häggström och Magnus Persson (1988)
Utvärdering av 1987 års vårflödesprognoser.
- 20 Todor Milanov (1988)
Frysförluster av vatten.
- 21 Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval and Maria Elvira Vega (1988)
Application of the HBV model to the upper Río Cauca basin.
- 22 Mats Moberg och Maja Brandt (1988)
Snökartläggning med satellitdata i Kultsjöns avrinningsområde.
- 23 Martin Gotthardsson och Sten Lindell (1989)
Hydrologiska stationsnät 1989. Svenskt Vattenarkiv.
- 24 Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval y Maria Elvira Vega (1989)
Aplicacion del modelo HBV a la cuenca superior del Río Cauca.
- 25 Gun Zachrisson (1989)
Svåra islossningar i Torneälven. Förslag till skadeförebyggande åtgärder.
- 26 Martin Häggström (1989)
Anpassning av HBV-modellen till Torneälven.
- 27 Martin Häggström and Göran Lindström (1990)
Application of the HBV model for flood forecasting in six Central American rivers.
- 28 Sten Bergström (1990)
Parametervärden för HBV-modellen i Sverige. Erfarenheter från modellkalibreringar under perioden 1975 - 1989.
- 29 Urban Svensson och Ingemar Holmström (1990)
Spridningsstudier i Glan.
- 30 Torbjörn Jutman (1991)
Analys av avrinningens trender i Sverige.
- 31 Mercedes Rodriguez, Barbro Johansson, Göran Lindström, Eduardo Planos y Alfredo Remont (1991)
Aplicacion del modelo HBV a la cuenca del Río Cauto en Cuba.
- 32 Erik Arnér (1991)
Simulering av vårflöden med HBV-modellen.
- 33 Maja Brandt (1991)
Snömätning med georadar och snötaxeringar i övre Luleälven.
- 34 Bent Göransson, Maja Brandt och Hans Bertil Wittgren (1991)
Markläckage och vattendragstransport av kväve och fosfor i Roxen/Glan-systemet, Östergötland.
- 35 Ulf Ehlin och Per-Eric Ohlsson, VASO (1991)
Utbyggd hydrologisk prognos- och varningstjänst.
Rapport från studieresa i USA
1991-04-22--30.
- 36 Martin Gotthardsson, Pia Rystam och Sven-Erik Westman (1992)
Hydrologiska stationsnät 1992/Hydrological network. Svenskt Vattenarkiv.
- 37 Maja Brandt (1992)
Skogens inverkan på vattenbalansen.
- 38 Joakim Harlin, Göran Lindström, Mikael Sundby (SMHI) och Claes-Olof Brandesten (Vattenfall Hydropower AB) (1992)
Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer för dimensionering av hel älv.
- 39 Sten Lindell (1993)
Realtidsbestämning av arealnederbörd.
- 40 Svenskt Vattenarkiv (1995)
Vattenföring i Sverige. Del 1. Vattendrag till Bottenviken.
- 41 Svenskt Vattenarkiv (1995)
Vattenföring i Sverige. Del 2. Vattendrag till Bottenhavet.
- 42 Svenskt Vattenarkiv (1993)
Vattenföring i Sverige. Del 3. Vattendrag till Egentliga Östersjön.

- 43 Svenskt Vattenarkiv (1994)
Vattenföring i Sverige. Del 4. Vattendrag till Västerhavet.
- 44 Martin Häggström och Jörgen Sahlberg (1993)
Analys av snösmältningsförlopp.
- 45 Magnus Persson (1993)
Utnyttjande av temperaturrens persistens vid beräkning av volymsprognoser med HBV-modellen.
- 46 Göran Lindström, Joakim Harlin och Judith Olofsson (1993)
Uppföljning av Flödeskommitténs riktlinjer.
- 47 Bengt Carlsson (1993)
Alkalinitets- och pH-förändringar i Ume-älven orsakade av minimitappning.
- 48 Håkan Sanner, Joakim Harlin och Magnus Persson (1994)
Application of the HBV model to the Upper Indus River for inflow forecasting to the Tarbela dam.
- 49 Maja Brandt, Torbjörn Jutman och Hans Alexandersson (1994)
Sveriges vattenbalans. Årsmedelvärden 1961 - 1990 av nederbörd, avdunstning och avrinning.
- 50 Svenskt Vattenarkiv (1994)
Avrinningsområden i Sverige. Del 3. Vattendrag till Egentliga Östersjön och Öresund.
- 51 Martin Gotthardsson (1994)
Svenskt Vattenarkiv. Översvämningskänsliga områden i Sverige.
- 52 Åsa Evremar (1994)
Avdunstningens höjdberoende i svenska fjällområden bestämd ur vattenbalans och med modellering.
- 53 Magnus Edström och Pia Rystam (1994)
FFO - Stationsnät för fältforskningsområden 1994.
- 54 Zhang Xingnan (1994)
A comparative study of the HBV model and development of an automatic calibration scheme.
- 55 Svenskt Vattenarkiv (1994)
Svenskt dammregister - Södra Sverige.
- 56 Svenskt Vattenarkiv (1995)
Svenskt dammregister - Norra Sverige.
- 57 Martin Häggström (1994)
Snökartering i svenska fjällområdet med NOAA-satellitbilder.
- 58 Hans Bertil Wittgren (1995)
Kvävetransport till Slätbaken från Söderköpingsåns avrinningsområde
- 59 Ola Pettersson (1995)
Vattenbalans för fältforskningsområden.
- 60 Barbro Johansson, Katarina Losjö, Nils Sjödin, Remigio Chikwanha and Joseph Merka (1995)
Assessment of surface water resources in the Manyame catchment - Zimbabwe.
- 61 Behzad Koucheiki (1995)
Ålvtemperaturers variationer i Sverige under en tioårsperiod.
- 62 Svenskt Vattenarkiv (1995)
Sänkta och torrlagda sjöar.
- 63 Malin Kanth (1995)
Hydrokemi i fältforskningsområden.
- 64 Mikael Sundby, Rikard Lidén, Nils Sjödin, Helmer Rodriguez, Enrique Aranibar (1995)
Hydrometeorological Monitoring and Modelling for Water Resources Development and Hydropower Optimisation in Bolivia.
- 65 Maja Brandt, Kurt Ehlert (1996)
Avrinningen från Sverige till omgivande hav.
- 66 Sten Lindell, Håkan Sanner, Irena Nikolushkina, Inita Stikute (1996)
Application of the integrated hydrological modelling system IHMS-HBV to pilot basin in Latvia
- 67 Sten Lindell, Bengt Carlsson, Håkan Sanner, Alvina Reihan, Rimma Vedom (1996)
Application of the integrated hydrological modelling system IHMS-HBV to pilot basin in Estonia
- 68 Sara Larsson, Rikard Lidén (1996)
Stationstäthet och hydrologiska prognoser.

- 69 Maja Brandt (1996)
Sedimenttransport i svenska vattendrag
exempel från 1967-1994.
- 70 Svenskt Vattenarkiv (1996)
Avrinningsområden i Sverige. Del 4.
Vattendrag till Västerhavet.
- 71 Svenskt Vattenarkiv (1996)
Svenskt sjöregister. 2 delar
- 72 Sten Lindell, Lars O Ericsson, Håkan Sanner,
Karin Göransson SMHI
Malgorzata Mierkiewicz , Andrzej
Kadlubowski, IMGW (1997)
Integrated Hydrological Monitoring and
Forecasting System for the Vistula River
Basin. Final report.
- 73 Maja Brandt, Gun Grahm (1998)
Avdunstning och avrinningskoefficient i
Sverige 1961-1990. Beräkningar med HBV-
modellen.
- 74 Anna Eklund (1998)
Vattentemperaturer i sjöar, sommar och vinter
- resultat från SMHIs mätningar.
- 75 Barbro Johansson, Magnus Edström, Katarina
Losjö och Sten Bergström (1998)
Analys och beräkning av
snösmältningsförlopp.
- 76 Anna Eklund (1998)
Istjocklek på sjöar.
- 77 Björn Bringfelt (1998)
An evapotranspiration model using SYNOP
weather observations in the Penman-Monteith
equation
- 78 Svenskt Vattenarkiv (1998)
Avrinningsområden i Sverige. Del 2
Vattendrag till Bottenhavet.
- 79 Maja Brandt, Anna Eklund (1999)
Snöns vatteninnehåll Modellberäkningar
och statistik för Sverige
- 80 Bengt Carlsson (1999)
Some facts about the Torne and Kalix
River Basins.
A contribution to the NEWBALTIC II
workshop in Abisko June 1999.
- 81 Anna Eklund (1999)
Isläggning och islossning i svenska sjöar.
- 82 Svenskt Vattenarkiv (2000)
Avrinningsområden i Sverige. Del 1.
Vattendrag till Bottenviken.
- 83 Anna Eklund, Marie Gardelin, Anders
Lindroth (2000)
Vinteravdunstning i HBV-modellen -
jämförelse med mätdata



Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 Norrköping
Tel 011-495 80 00 · Fax 011-495 80 01