

VÄXELVEKAN MELLAN VEGETATION OCH VATTNETS KRETSLOPP

Vegetation and water cycle interaction

av THOMAS GUMBRICHT

Mark- och vattenresurser KTH, S-100 44 Stockholm

e-post: thomgum@l.kth.se

Abstract

The paper suggests a reciprocity between the landscape and the water cycle. Different processor properties of the water cycle dominate in different landscapes, mainly dependent on the vegetation cover and degree of ecological development. Satellite images and geographic information systems are used for recognising pattern similarities between the water cycle and the landscape. A new type of simulation model for modelling the water-vegetation interaction is presented.

Key words – Landscape hydrology, modelling, geoinformatics, Cyprus.

Sammanfattning

Landskapet och vattencykeln står i nära växelverkan. Beroende på landskapets grad av vegetationstäckning och ekologiska utveckling dominerar olika processoregenskaper hos vatten. I artikeln används satellitdata och geografiska informationssystem för att tolka samband mellan vattencykeln och landskapet. En ny typ av simuleringsmodell för att modellera sambandet mellan vatten och vegetation presenteras.

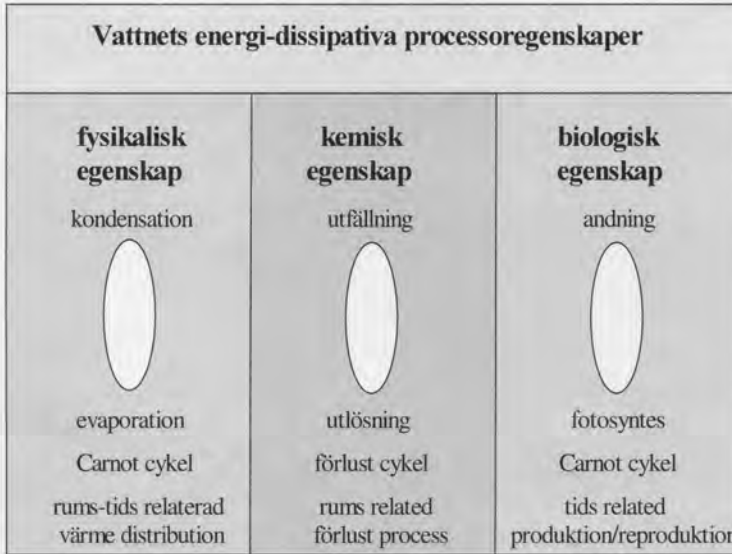
Inledning

Vattnets unika egenskaper knyter samman processer och mönster i både naturen och samhället (Eagleson 1986, Stumm 1986). I min avhandling (Gumbrecht 1996 a) ställer jag upp hypotesen att landskapets struktur har en naturlig vattenlogik skapat av processer i vattnets kretslopp. Jag gör också antagandet att livet under sin utveckling tagit vattnets processoregenskaper i sin tjänst för att kontrollera både funktioner och strukturer, exempelvis atmosfärens sammansättning, markprofilens utseende och vattenhållande förmåga, eller temperaturfördelning över dygnet. Skogen, det odlade landskapet, respektive den helt bara marken dominerar därför av olika processer i vattnets kretslopp. Min tanke var från början att använda dessa hypoteser för att formulera en ny typ av hydrologisk modell för flödes- och transportberäkningar. Men arbetets innebörd har vidgats med tiden och också givit upphov till vattenperspektiv på klimat och bärkraftig utveckling. Data och modeller för att testa de olika hypoteserna bygger i hög utsträckning på användning av, och integrering med geografiska informationssystem (GIS) och fjärranalys.

Vattnets roll i landskapet

I ett naturligt landskap förskingras (eller dissiperas) variationer i instrålad solenergi framförallt genom avdunstning och kondensation av vatten. Vid hög instrålning

(läs: under dagen) avdunstar vatten, under natten kondenserar samma vatten. Detta slätar ut dygnets temperaturskiftningar exempelvis vid sjöar och längs kuster. Vegetationen ökar både avdunstningsförmågan och lagringskapaciteten för vatten. Dissiperingen av solenergi dominerar därför av avdunstning där vegetationen är tillräckligt tät och/eller marken är tillräckligt fuktig (Avisar 1995). På sådana platser värms luften ovan marken upp långsamt, och ett avsnött vattenrikt skikt bildas med en övre gräns på cirka 1000 meters höjd. När solstrålningen minskar under eftermiddagen blir skiktet vattenmättat och vatten kondenseras (också med hjälp av kondensationskärnor emitterade av vegetationen). En tät och utbredd vegetation leder således till ett delvis slutet vertikalt kretslopp av vatten. Den beskrivna skalan av ett slutet vattenkretslopp är bara en i en kontinuerlig hierarki av skalor ('fraktaler'); redan vid bladets klyvöppningar återvinns vatten i skyddande hår, inom kronaket sker också en cirkulation, och ovanför landskapsnivån är vattenkretsloppet även slutet inom en kontinent. De överliggande skalorna är långsammare och begränsar därmed vattentillgången för de lägre. Det betyder också att kumulerade förändringar på en skala absorberas av överliggande tills en viss tröskel passerats och en ny dynamiskt jämvikt ställer in sig. Det hydrologiska systemet uppvisar 'flip-flop' beteende, återspeglar i oftare återkommande översvämningar och torrperioder i områden med förlorad vegetation. Bevis för det finns exempelvis från Sahel området där förluster av vegetation lett till nya mönster av luftströmmar, torka, ytterligare



Figur 1. Vattnets tre processoregenskaper.

förluster av vegetation, än mindre vatten osv (Kutzbach et al., 1996). Denna tendens av egenförstärkande effekter (synonym: positiva återkopplingar, eng. 'positive feedback') är inte ovanliga inom vattnets kretslopp och dess interaktion med andra kretslopp.

Med variationerna i avdunstning och nederbörd i både tid och rum, och landskapets relief, uppstår potentialskillnader hos det vatten som finns i och på marken. Detta driver mark- och grundvattenflöden, och därmed avrinning och transport. Vattenpotentialen förknippas vanligtvis med läge och tryck, vilket, måhända osökt, leder till en föreställning av abiotisk kontroll av vattenflödet. Det kan argumenteras att potentialen istället i första hand är betingad av vegetationens lagring och transport av vatten, och att gravitationen endast spelar en roll när vatten finns i sådan mängd att växterna inte längre klarar av att kontrollera den totala mängden vatten.

Är flödet långsamt (i förhållande till både mediets och vätskans, i vårt fall, vattnets, egenskaper) kan man anta att det också är laminärt; vattenmolekylerna rör sig parallellt. Detta flöde kan modelleras med Darcy's lag, som säger att flödet över ett tvärsnitt är proportionellt mot potentialskillnaden mellan snittets sidor och den hydrauliska konduktiviteten (vattenledningsförmågan beroende både av vätskan och mediet). Darcy's lag gäller för såväl mättat som omättat flöde, men vid tillämpningar i fält negligeras exempelvis luftfasens betydelse, kompressibilitet i vätska och medium, saltinnehållets inflytande på viskositet och osmos, och kaotiska molekyl-

rörelser vid fasgränser. Är flödet snabbare (egentligen om Reynold's tal överskrids) uppstår turbulent flöde. För att modellera sådant flöde används Navier-Stokes ekvation, som dock i princip är omöjlig att lösa på grund av att den information som finns tillgänglig är alltför begränsad.

Antagandet om linjära förhållanden vid olika beräkningar av vattenströmning undergrävs ytterligare av vattnets förmåga att dissociera till hydroxyl (OH⁻) och väte (H⁺) joner. Dissocieringen leder till att vatten löser ut salter ur det medium det flyter genom. Dissocieringen är icke linjärt beroende på vattenmolekylernas rörelseenergi, och sker preferentiellt i anslutning till gränsskikt där molekylrörelserna är mer kaotiska. Potentialen som driver vattenflödet dissiperas således till bland annat joniseringsenergi och värme, vilket ändrar både vattnets och mediet egenskaper. När vattenflödet accelererar löses salter ut, när den retarderar faller de ut (kristalliseras). Detta är naturligtvis av största vikt för att förstå vattnets roll, också därför att vegetationen använder vattnet som transport- och lösningsmedel för att dra till sig de utlösta salter som är livsnödvändiga för dem.

Vatten har också en biologisk funktion som energibärare. Sänks pH till 0 dissocierar vattnet, och de fria vätejonerna kan reducera koldioxid (CO₂) till kolväteradikaler vilka kan sättas samman till socker. Syre (O₂) uppstår som en restprodukt. Detta är en naturlig process vilken växterna koncentrerat i sitt klorofyll genom att kanalisera solenergi med vissa våglängder. Andningen är den motsatta reaktion som åter spjälkar sockret i vatten och koldioxid.

Sammanfattningsvis har vattnet tre processoregenskaper (Ripl 1995) (Fig. 1): en fysikalisk (avdunstning-kondensering), en kemisk (utlösning-kristallisering) och en biologisk (fotosyntes-respiration). Livet har tagit alla tre i sin tjänst, koncentrerat och raffinerat dem i tid och rum, och på så sätt skapat sitt eget livsmedium.

Tolkning av landskapets vattencykel med satellitbilder

Komplexiteten hos vattenkretsloppet kräver nya angreppssätt. De matematiska modeller som löser de ekvationer man i laboratorium funnit styra vattnets flöde (ex.v. Darcys's lag) måste förbättras eller bytas ut. Genom tillväxten i datakapacitet är båda vägarna i princip framkomliga.

Ett sätt att tolka komplexa problem, exempelvis vattens och vegetationens växelverkan på landskapsskalan, är att använda mönstertolkning. Detta kan liknas vid medicinsk EKG analys som ger information om hjärtat. Att modellera hjärtfunktionen utifrån samverkan mellan nervimpulser, muskelkontraktioner och blodets strömning är inte möjligt.

Mönstertolkning bygger på högupplösta data i tid och/eller rum. Tillgången på sådan data på landskapskala har ökat dramatiskt under senare år med hjälp av olika sensorer, inklusive satelliter. Figur 2 visar ett avrinningsområde på Cypern där högupplöst rumsdata har kodats till höjd över havet, uppströmsarea, fuktighet och bladyteindex (bladarea per markarea) (från McCarthy 1996). Det finns tydliga relationer mellan de olika informationsskikten. Till följd av osäkerheter i positioner och beräkningar är det mycket svårt att fastställa några kvantitativa samband i bilden. Relationen mellan vegetation och fuktighet är dock signifikant. Däremot finns inga samband mellan höjd eller uppströmsarea och någon av de andra funktionerna. Då satellitbilden som data byggs på är tagen under den cypriotiska torrperio-

den (augusti 1984) kan detta tolkas som att vegetationen har kontroll över det tillgängliga vattnet. En konfirmering av den uppställda hypotesen.

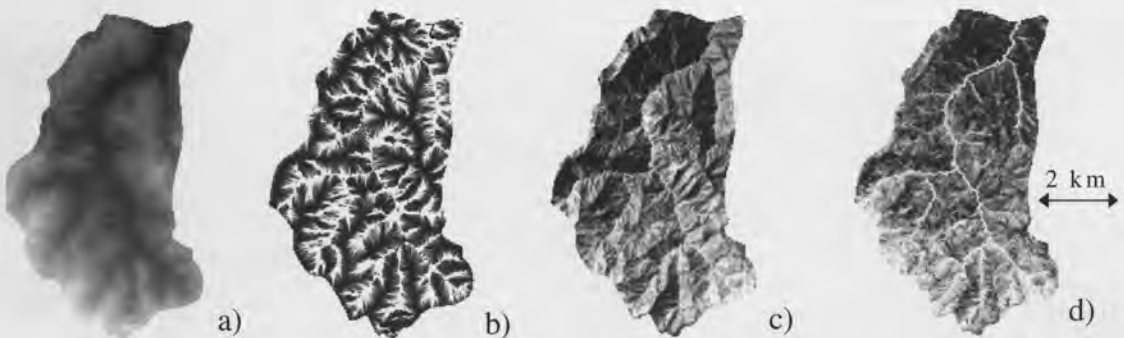
Den typ av logiska samband som finns mellan vattencykeln och landskapsmosaik kan utnyttjas för att producera tematiska kartor över ex.v. risker (erosion, skred, föroreningsspridning), behov (bevattning, kalkning, marksanering) eller klasser (vegetationstyper, jordarter) (Gumbrecht et al. 1995, Chmiel & Gumbrecht 1996).

Simulering av landskapets vattencykel

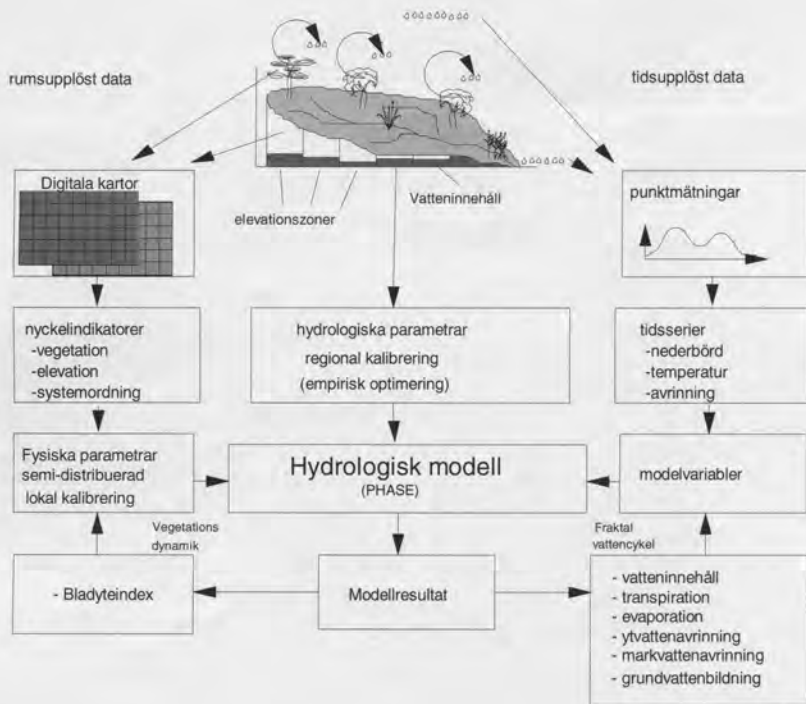
Vattencykeln är drivkraften bakom transport av sediment och föroreningar i och över ett avrinningsområde. Detta har lett till matematiska beskrivningar av (kopp-lade) yt- och markflöden med analytiska eller numeriska lösningar av de involverade fysikaliska lagarna. Förenklingar har introducerats för att bygga distribuerade modeller, exempelvis SHE modellen (Abbot et al. 1986). Utvecklingen har gått mot mindre och mindre areella byggstenar under antagandet att variationer i landskapet minskar med ökad upplösning. Detta antagande är idag kullkastat (Mandelbrot 1982), och framkomligheten med denna typ av modeller är också starkt ifrågasatt (Beven 1989, Gan & Burgess 1990, Grayson et al. 1992).

Med framväxten av GIS har framförallt sluttning-relief blivit en vanlig utgångspunkt för ytterligare förenklingar till sluttningssparallella två-dimensionella modeller (Beven & Kirkby 1979, Troendle 1985). Antagandet bakom denna förenkling är att sluttningsprofilen kan användas för att representera flödesvägar och fuktighetsgradienter. Med tanke på vad som sagts och påvisats ovan kan detta ifrågasättas.

Eftersom småskaliga variationer i avrinningsområdet slätas ut över större områden fungerar fortfarande icke distribuerade modeller baserad på enhetshydrografen



Figur 2. Skogsklätt avrinningsområde (Limnitis) på Trodoos norra sluttning, Cypern (se fig. 3): a) höjd över havet, b) uppströmsarea, c) fuktighetsindex, och d) bladyteindex. Ljusa färger indikerar högre värden i alla bilder (från McCarthy, 1996).



Figur 3. Samband mellan landskapets struktur och hydrologiska respons som det tolkas i PHASE modellen (se text) (från Gumbrecht 1996 a).

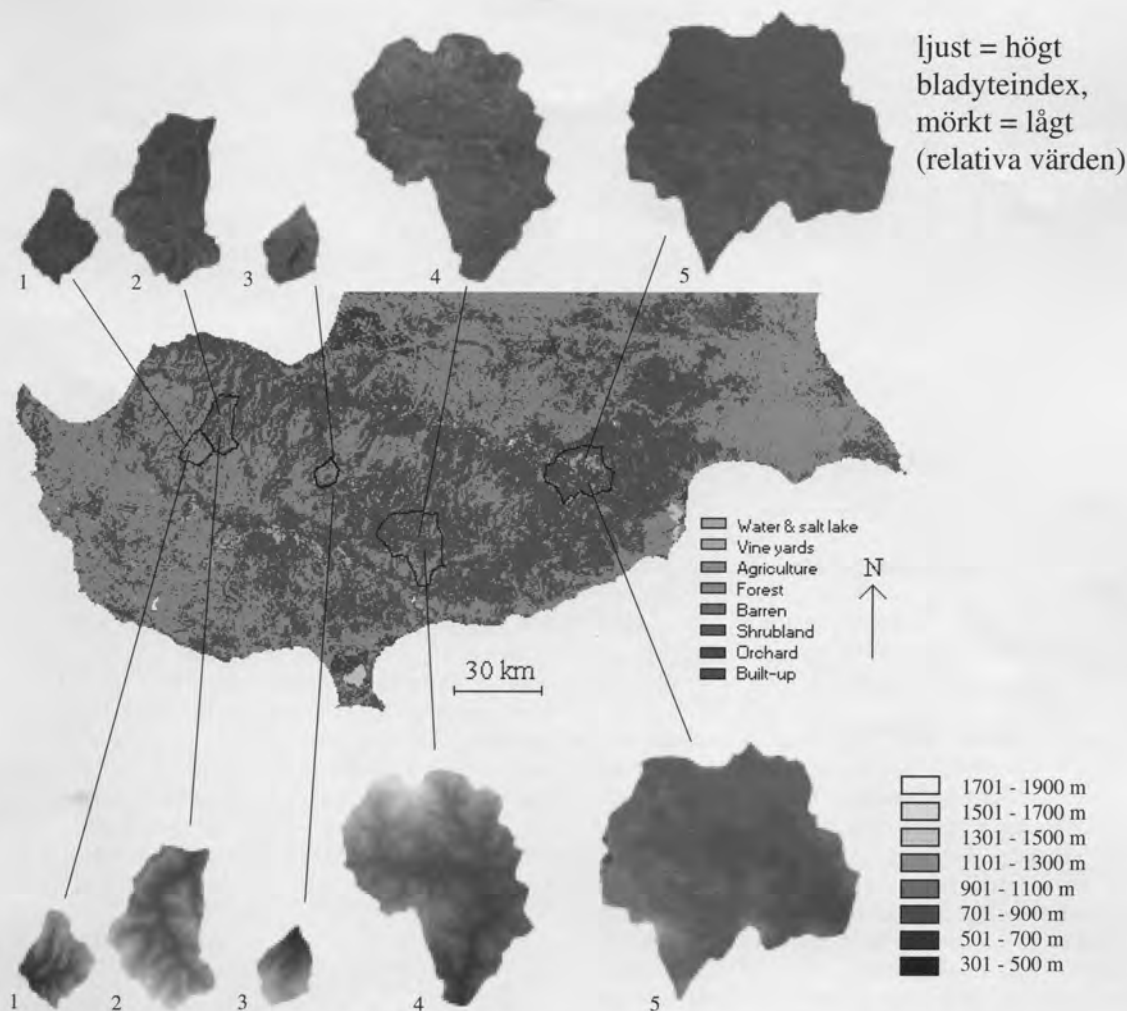
(Maidment 1993) eller konceptuella markförhållanden (Bergström 1992) lika bra som de mer fysikaliska och/eller distribuerade modellerna. Detta har lett till ett mellanting – hydrologiska respons enheter (Knudsen et al. 1986), vilka delar in avrinningsområdet i homogena 'tärtbitar'. Beräkningarna förenklas men information om rumsliga relationer går förlorad – det har ingen betydelse om skogen ligger på höjden eller invid vattendraget.

Mycket av problemen med dagens modeller hänger samman med verklighetens icke-linjära förhållanden mellan olika skalor samt återkopplingsmekanismer. För att överbrygga dessa problem har flera författare föreslagit användningen av logiska nyckelförhållanden för modellparameterisering (ex.v. Moore et al. 1993). Detta angreppssätt ger avkall på en korrekt beskrivning av de fysikaliska förhållandena sådana vi känner dem från laboratorium och idealiserade förhållanden. För att kunna testa hypotesen om vegetationens och sluttningens betydelse har mina medarbetare och jag utvecklat en sådan alternativ model – PHASE (Gumbrecht 1996 b, Gumbrecht et al. 1996). Modellen är nära kopplad till GIS och fjärranalysdata, vilka används för lokal parametersättning av modellen. Idén är att markförhållanden kalibreras genom optimering mot befintliga data (Fig. 3). Kalibreringen kan reduceras till tre parametrar (maximal vattenhållande förmåga, fältkapacitet och andel av markvattnet ovan fältkapaciteten som rinner av per tids-

steg), varvid modellen fungerar som en traditionell model av HBV-typ (Bergström 1992). Parametrar för grundvattenbildning, fraktal nederbörd och vegetationdynamik ger modellen olika grad av återkopplingsmekanismer. Genom att sätta värden på minimal markvattenhalt och flödesvägar erhålls mer fysikaliskt korrekta uppehållstider. När modellen tillämpas på ett avrinningsområde hämtas parametrar för area, elevation och sluttning profiler automatiskt ur GIS data (Fig. 3). Modellen delar automatiskt upp avrinningsområdet i höjdzoner, vilka beräknas separat genom varje tidssteg.

Modellen är avsedd för att arbeta med dygnsvärden, men kan också matas med månadsvärden. Temperatur och elevation bestämmer om nederbörden faller som snö eller regn, och om eventuell snö smälter. Vatten som tillförs markytan lagras först i vegetationen, vilken fungerar som en dynamisk 'svamp' – med ökad vattenhållande förmåga när det finns mycket blad, biomassa och humus. Vegetationen kartläggs med satellitdata och simuleras sedan av modellen i varje tidssteg. Först när inte vegetationen kan hålla vattnet perkolerar det till djupare lager, varvid funktionerna för avrinning och grundvattenbildning träder in. Vegetationen kan ta vatten även ur detta magasin, men det kontrolleras inte 'aktivt' av vegetationen.

Det största problemet med modellen har varit beskrivningen av flödesvägar utefter sluttningen. Detta beror dels av problemet med kvalitet i data, dels av valet



Figur 4. Avrinningsområden på Cypern vilka använts för att testa PHASE modellen och dess förmåga att förutsäga flöde med hänsyn till lokala variationer, 1) Ezousas, 2) Limnitis, 3) Karyotis, 4) Yermasoyia, och 5) Tremithios.

av algoritm och upplösning i data. Olika fel, algoritmer och upplösningar ger upphov till mycket olika resultat, vilka också kan fortplanta sig och förstärkas vid stegvisa beräkningar. Denna del av modellen, om än väsentlig, har därför inte kunnat testas färdigt.

Modelltester med PHASE modellen

PHASE-modellen har testats mot data från Cypern (Gumbrecht et al. 1996), Himalaya (Gumbrecht et al. 1997), Nicaragua (Hessling et al. 1997a) och Sverige. Cypern har ett mycket väl utvecklat nät för mätning av klimat, nederbörd och avrinning. All denna data har välvilligt ställts till KTH's förfogande, och mycket av PHASE utveckling bygger på denna data. För att testa

hypotesen om vegetationens inflytande valdes fem avrinningsområden med olika karaktär ut (Fig. 4). Vart och ett av dessa kalibrerades individuellt, och en regional parametersättning skapades genom att ta medelvärden från dessa. Denna regionala kalibrering användes sedan för att verifiera modellen mot samma fem områden (tabell 1). Vid verifiering användes dels en distribuerad vegetationskarta, dels en medelvärdeskarta.

Av tabell 1 framgår att PHASE-modellen klarar av att kalibreras regionalt och sedan tillämpas på avrinningsområden med olika karaktär utan kalibrering. Nedgången i förklaringsgrad beror mycket på att ett litet vattendrag (Karyotis) med osäkra värden ingick i studien. I en tidigare studie med endast tre av de övriga var överförbarheten mellan olika vattendrag större (Gumbrecht 1996b).

Tabell 1 Modellresultat och LAI estimeringar för PHASE modellen applicerade på 5 cypriotiska avrinningsområden (Fig. 4).

Avrinnings- område	Modellresultat (modifierat R2 – Nash and Sutcliff, 1970)				LAI estimat
	enskild parametersättning		medel parametersättning		
	enskilt LAI	medel LAI	enskilt LAI	medel LAI	enskilt
1 Ezousas	0.58	0.52	0.33	0.32	8.28
2 Limintis	0.60	0.59	0.58	0.57	7.73
3 Karyotis	0.58	0.57	0.28	0.26	7.60
4 Yermasoia	0.70	0.68	0.58	0.56	7.51
5 Tremithios	0.52	0.52	0.46	0.42	6.72

Fortsatt utvecklingsarbete

PHASE-modellen har byggts ut med en grundvattenrutin som kan användas för att simulera grundvattenstånd och grundvattenomsättning (Hessling et al. 1997 a). Grundvattenversionen kräver väsentligt mer data om markförhållanden i form av GIS-kartor. Sådan information är ofta svår att skapa, särskilt i glaciala områden med småkuperad terräng (se Gumbricht & Thunvik 1997).

Då modellen kopplar samman landskapet, vegetationen och vattencykeln kan den användas för att simulera effekter av olika förändringar i både tid och rum. Studier där modellen använts inkluderar hydrologiska effekter av storskalig vegetationsförändring (Hessling et al. 1997 b), respektive potentiella effekter av en global klimatförändring skapad av en ökning av atmosfärens innehåll av koldioxid (Gumbricht 1996 c). Den förra studien visade att vattencykeln och den ekologiska utvecklingen efter en stor skogsbrand kan beskrivas väl av växelverkande logistiska funktioner i vegetationstillväxt respektive vertikal slutenhet av vattencykeln. Den senare studien visar tydligt att klimat, vattencykel och vegetation hänger intimt samman, och att olika återkopplingsmekanismer ger upphov till mycket stora osäkerheter i respons hos olika delsystem vid transienta förändringar.

En utmaning är att utveckla modellen till ett aktivt verktyg för planerare och beslutsfattare inom vattensektorn. Vi har tillsammans med olika intressenter sökt om medel för en sådan utveckling, med tillämpningar i småländska vattendrag. För att öka modellens användbarhet utvecklats för närvarande ett bättre gränssnitt.

Slutsats

De presenterade tolkningarna och simuleringarna konfirmerar antagandet att landskapet och vattencykeln är uttryck för en växelverkande ömsesidighet. Detta komplexa system kan därför inte modelleras eller manipuleras utifrån antagandet om orsak och verkan i olika

delsystem. För att skapa en bärkraftig utveckling krävs helhetsperspektiv, symmetrin mellan funktioner och strukturer måste tolkas platsspecifikt och med hjälp av högupplösta data.

Som för alla modeller bör man vara modest vid tillämpningen av PHASE. Andra modeller (inklusive HBV) är bättre skickade att göra flödesberäkningar givet att beräkningen inte görs med förhållanden utanför dem som rått under kalibreringsperioden. PHASE modellen är idag mest ett verktyg för att testa hypoteser, och för att simulera potentiella förändringar i det kopplade systemet vegetation-vatten. Med sin relativt enkla uppbyggnad och fokusering på nyckelförhållanden kan modellen förhoppningsvis bli ett verktyg för bärkraftig hushållning med dessa landskapets viktigaste resurser.

Referenser

- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell P. E & Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 87, 61–77.
- Avisar, R., 1995. Recent advances in the representation of land-atmosphere interactions in general circulation models. *Reviews of geophysics, supplement, U.S. national report to international union of geodesy and geophysics 1991–1994*, pp. 1005–1010.
- Bergström, S., 1992. The HBV model – its structure and application. *Reports Hydrology, No 4*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models. *J. Hydrol.* 105, 157–172.
- Beven, K. & Kirkby, M. J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43–69.
- Chmiel, J. & Gumbricht, T., 1996. Knowledge based classification of landscape objects combining satellite and ancillary data. I Kraus Waldhäusl (eds), *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, part B4*, pp 183–187, Vienna.
- Eagleson, P. S., 1986. The emergence of global-scale hydrology. *Water Resour. Res.* 22, 6s–14s.

- Gan, Y.G. & Burges, S. J., 1990. An assessment of a conceptual rainfall-runoff model's ability to represent the dynamics of small hypothetical catchments. 2. Hydrological response for normal and extreme rainfall. *Water Resour. Res.* 26, 1605–1619.
- Grayson, R. B., Moore, I. D. & McMahon, T. A., 1992. Physically based modelling: II Is the concept realistic? *Water Resour. Res.* 28, 2659–2666.
- Gumbricht, T., 1996a. Modelling water and vegetation reciprocity – a landscape synthesis in GIS. Div. of Land and Water Resources, Royal Institute of Technology, TRITAMI PHD 1011. Avhandling.
- Gumbricht, T., 1996b. Landscape interfaces and transparency to hydrological functions. I Kovar & Nachtnebel (eds), *HydroGIS '96. Application of Geographical Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publ. No 235, pp 115–121.
- Gumbricht, T., 1996c. Hydroclimatic processes and spatio-temporal landscape patterns. I Sigurdsson, Einarsson & Adalsteinsson (eds), *Nordic Hydrological Conference*, NHP-Report No. 40, pp. 360–368.
- Gumbricht, T., Mahlander, C. & McCarthy, J., 1995. Rule based and contextual classification of landscape patches and boundaries. I Björke (ed), *ScanGIS'95. The 5th Scandinavian Research conference on GIS*, Trondheim, pp 245–255.
- Gumbricht, T. & Thunvik, R., 1996. 3D hydrogeological modelling with an expert GIS interface. *Nordic Hydrology*, i tryck.
- Gumbricht, T., Hessling, M. & McCarthy, J., 1996. Hydrological modelling integrating landscape pattern – A case study of Cyprus. I Sigurdsson, Einarsson & Adalsteinsson (Eds), *Nordic Hydrological Conference*, NHP-Report No. 40, pp. 529–537.
- Gumbricht, T., H. Lindholm, A. Åkre, R. Szczepanek, M Hessling and J. McCarthy, 1997. GIS-integrated, fuzzy modelling of land surface pattern and processes in a Himalayan basin. *International Journal of Water Resources Development*, 13, 67–78.
- Hessling, M., McCarthy, J. & Gumbricht, T., 1997a. Modelling the Managua aquifer 2: groundwater dynamics. In H. Hauska (Ed.), *ScanGIS '97, The 6th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Systems 1st – 3rd June 1997 Stockholm Sweden*, pp. 209–215.
- Hessling, M., McCarthy, J. & Gumbricht, T., 1997b. Traces in the Cyprus streams 2: A forest fire pair basin study. *Insänd till Nord. Hydrol.*
- Knudsen, J., Thomsen, A. & Refsgaard, J.C., 1986. WATBAL, A semi distributed, physically based hydrological modelling system. *Nord. Hydrol.* 17, 347–362.
- Kutzbach, J., Bonan, G., Foley, J. & Harrison, S., 1996. Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene. *Nature*, 384, 623–626.
- Maidment, D. R., 1993. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. I Kovar & Nachtnebel (eds), *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, IAHS Publ. No. 211, pp. 181–192.
- Mandelbrot, B. B., 1982. *The fractal geometry of Nature*, Freeman, San Francisco.
- McCarthy, J., 1996. Leaf area estimation for hydroclimatological models, I Sigurdsson, Einarsson & Adalsteinsson (Eds), *Nordic Hydrological Conference 1996*, NHP-Report No. 40, pp. 205–214.
- Moore, I. D., Turner, A. K., Wilson, J. P., Jenson, S. K., & Band, L. E., 1993. GIS and land-surface-subsurface process modeling. I Goodchild, Bradley & Steyart (eds), *Environmental modeling with GIS*, Oxford University Press, pp. 196–230.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Ripl, W., 1995. Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy-transport-reaction (ETR) model. *Ecol. Modelling* 78, 61–76.
- Stumm, W., 1986. Water, an endangered ecosystem. *Ambio* 15, 201–207.
- Troendle, C. A., 1985. Variable source area models. I Andersson & Burt (eds), *Hydrological Forecasting*. John Wiley and Sons, New York, pp. 347–403.