

NÅR SMELTEVANDET ER EN VIGTIG RESSOURCE



Mange regioner i Sydamerika er afhængige af smeltevand fra Andesbjergene. Derfor arbejder forskere med at kortlægge, hvilken betydning de stigende temperaturer har på den nuværende og fremtidige vandforsyning.

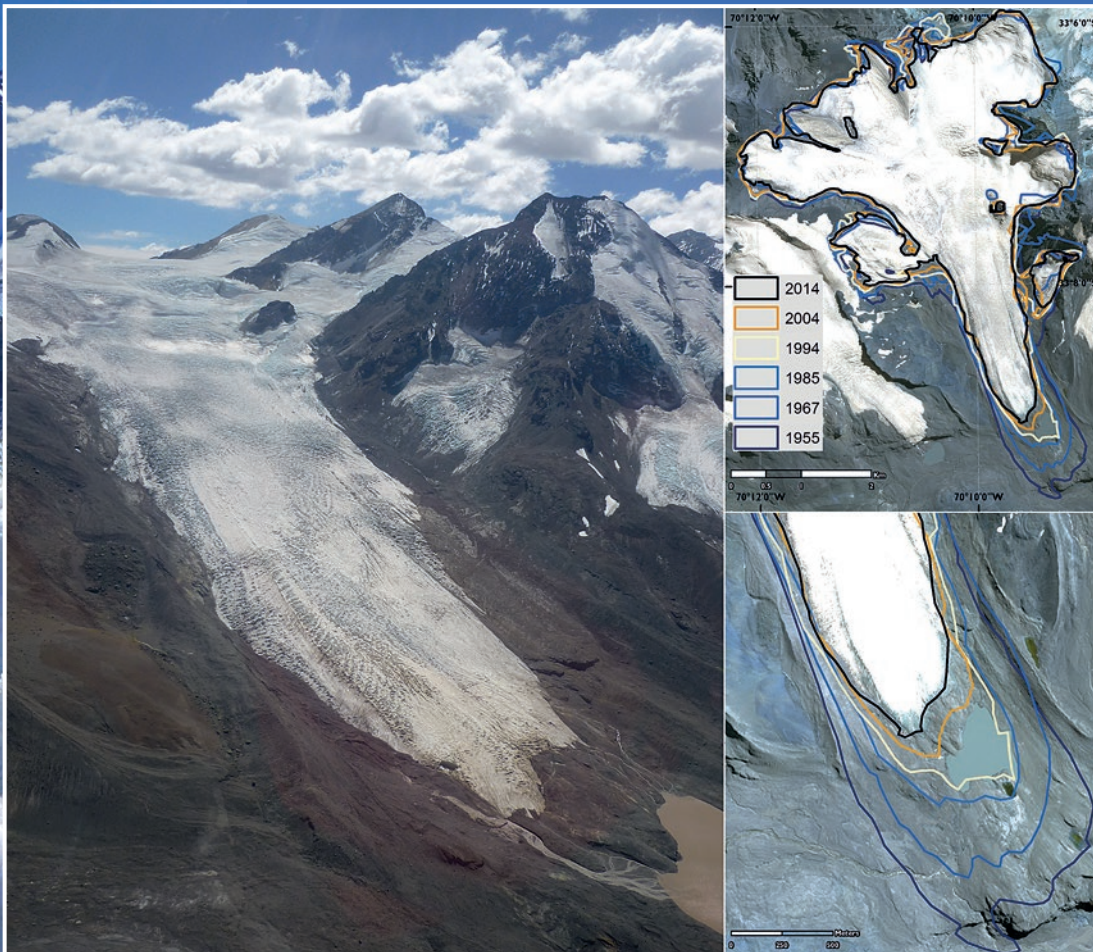
I Sydamerika fra Columbia i nord til Patagonien i syd – både øst som vest for Andesbjergene – lever millioner af mennesker, hvis dagligdag er påvirket af Andesbjergenes klima- og smeltevandsforhold. Smeltevand fra sne og gletschere har betydning for drikkevandsforsyningen, produktionen af elektricitet, mineindustrien og for fødevarer- og vinproduktionen.

De højere beliggende områder af Andesbjergene 3.000–5.500 meter over havet er et af de geografi-

ske områder, hvor temperaturstigningen har slået igennem. Siden 1979 er lufttemperaturen her steget i gennemsnit 0,5–1,5 °C pr. årti. En stigning, der er op til tre-fire gange højere end stigningen i den globale middeltemperatur for samme periode.

Man har dog kun sparsomme feltobservationer af sne- og gletscherforholdene i Andesbjergene. Det skyldes, at feltarbejde i Andesbjergene er risikofyldt, udfordrende og fysisk krævende på grund

af højderne, hvor der er et lavere iltindhold i atmosfæren og et ufremkommelige terræn med barske og let omskiftelige vejrforhold. Derfor er færre end 25 gletschere – ud af de mere end cirka 20.000 individuelle gletschere, der findes i Sydamerika – gennem kortere og længere perioder blevet observeret med henblik på at kortlægge deres massebalance. Massebalancen er kort sagt forskellen mellem den sne, der akkumuleres på gletscheren, og det, der smelter bort af sne og is over et år.



↑ Gletscheren Olivares Gamma ligger ca. 40–45 km nordøst for Santiago de Chile, og den ligger i én af de fire nøgleregioner i forskningsprojektet. Gletscheren er 14,4 km² og spænder i højde fra cirka 3.600 til 4.900 meter over havet. Afstanden fra gletschertungen til toppen af gletscheren er cirka fem kilometer. Fotoet er taget med drone i marts 2016 (foto: Sebastian H. Mernild). Til højre ses gletscherranden bestemt ud fra fly- og satellitbilleder fra 1955 (14,4 km²) til 2014 (11,4 km²) svarende til en reduktion i arealet på 21 %.

← Vi borer huller i gletscheren til stager for at bestemme dens massebalance. Stagerne er placeret i forskellige højder fra randen og til toppen af gletscheren, så vi kan bestemme den højdemæssige variation i massebalancen. Fotoet er taget midt på gletscheren i omkring 4.000 meters højde i marts 2015.

De sne- og gletscherdækkede områder langs Andesbjergene varierer i højde fra havniveau i Patagonien til 3.500–6.000 meter over havet i det centrale Chile, Argentina, Bolivia, Peru, Ecuador og Columbia. Højdeforholdene i det centrale Chile og nordpå gør, at mange af disse sne- og gletscherdækkede områder kun kan besøges via helikopter eller på hesteryg.

Fra observationer til modelarbejde

Inden for det seneste årti er der forskningsmæssigt kommet mere

fokus på de klimatiske forhold og afsmeltningen i Andesbjergene. Det skyldes ikke mindst, at man gerne vil vurdere, hvilken betydning klimaændringerne har og på længere sigt vil få på smeltevandsmønstre og dermed på de tilgængelige vandressourcer. Især har man interesseret sig for området i nærheden af Santiago de Chile, der er beliggende i den mest folkerige region i Chile med mere end ti millioner indbyggere. En region, der også er samfundsøkonomisk betydningsfuld, når det

gælder fødevarer- og vinproduktion og udvinding af kobber.

Området omkring Santiago de Chile er en af fire folkerige eller økonomisk vigtige nøgleregioner, der nøje er udvalgt i et forskningsprojekt, der skal øge kendskabet til de nuværende vandressourcerforhold. Foruden Santiago de Chile gælder det Quito i Ecuador, Cusco/Lima i Peru og Patagonien i Chile og Argentina. Siden 2014 har et internationalt forskerhold ledet af førsteforfatteren til

Forfatterne



Sebastian H. Mernild er professor (ph.d. og dr. scient.) i klimaforandringer og glaciologi i Norge ved Faculty of Engineering and Science, Sogn og Fjordane University College (HiSF). Fra december tiltræder han stillingen som CEO for det anerkendte forskningcenter Nansen Centeret i Bergen og vil samtidig være tilknyttet HiSF som forskningsprofessor. sebastian.mernild@hisf.no (fra december: mernild@nersc.no).



Jeppe K. Malmros er ph.d.-studerende ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han arbejder med kortlægning af sne- og gletscherforhold i Andesbjergene. vvh636@alumni.ku.dk

Feltarbejde i Andesbjergene

På feltarbejde er der mange ting at gøre for forskere, der gerne vil forstå klimaforandringerne og påvirkning på sne- og gletscherforholdene.

På fotoet er vi i færd med at installere temperatursensorer på gletscheren Olivares Gamma. Vi borer også stager ned i samme gletscher for at bestemme dens massebalance. Stagerne er placeret i forskellige højder fra randen og til toppen af gletscheren, så vi kan bestemme den højdemæssige variation i massebalancen. Fotoet er taget midt på gletscheren i omkring 4.000 meters højde i marts 2015.

Derudover opmåler vi gletscherens beliggenhed, og vi laver albedo-målinger for bedre at forstå variationer i albedo og i energibalancen på sne- og isoverflader. Albedo er et videnskabeligt udtryk for forholdet mellem mængden af reflekteret solenergi fra overfladen



Foto: Edward Hanna

og den totale mængde solenergi, der rammer overfladen. Ved hjælp af laser-scanninger måler vi gletscherens overfladehøjde for at finde ud af, hvor meget gletscherens overflade "sætter sig" på grund af klimaforandringer.

For at bestemme smeltevandets

strømningsveje og hastighed gennem og under gletscherisen laver vi forsøg, hvor vi hælder et uskadeligt farvestof i vandet og ser, hvor det kommer ud igen. Vi måler også mængden af smeltevand, der strømmer i vandløbene ved at installere hydrometriske stationer nedstrøms for gletscherne.

denne artikel gennemført flere ekspeditioner til Andesbjergene med det formål at analysere klimaet og dets effekt på sne- og gletscherforholdene. Vi har opsat måleinstrumenter og etableret systematiske målekampagner, og efterfølgende er de indsamlede feltdata blevet analyseret og sammenlignet med informationer fra fly- og satellitbilleder for at forstå ændringer i gletscherareal siden 1950'erne.

For at få en dybere forståelse af sammenhængen mellem observationer fra nøgleregionerne og mere overordnede klima- og sne/gletscherforhold langs Andesbjergene har vi anvendt et modelsystem kaldet SnowModel/HydroFlow til at simulere meteorologiske forhold samt forhold vedr. snefordeling, gletschermassebalancer og smeltevand i vandløbene.

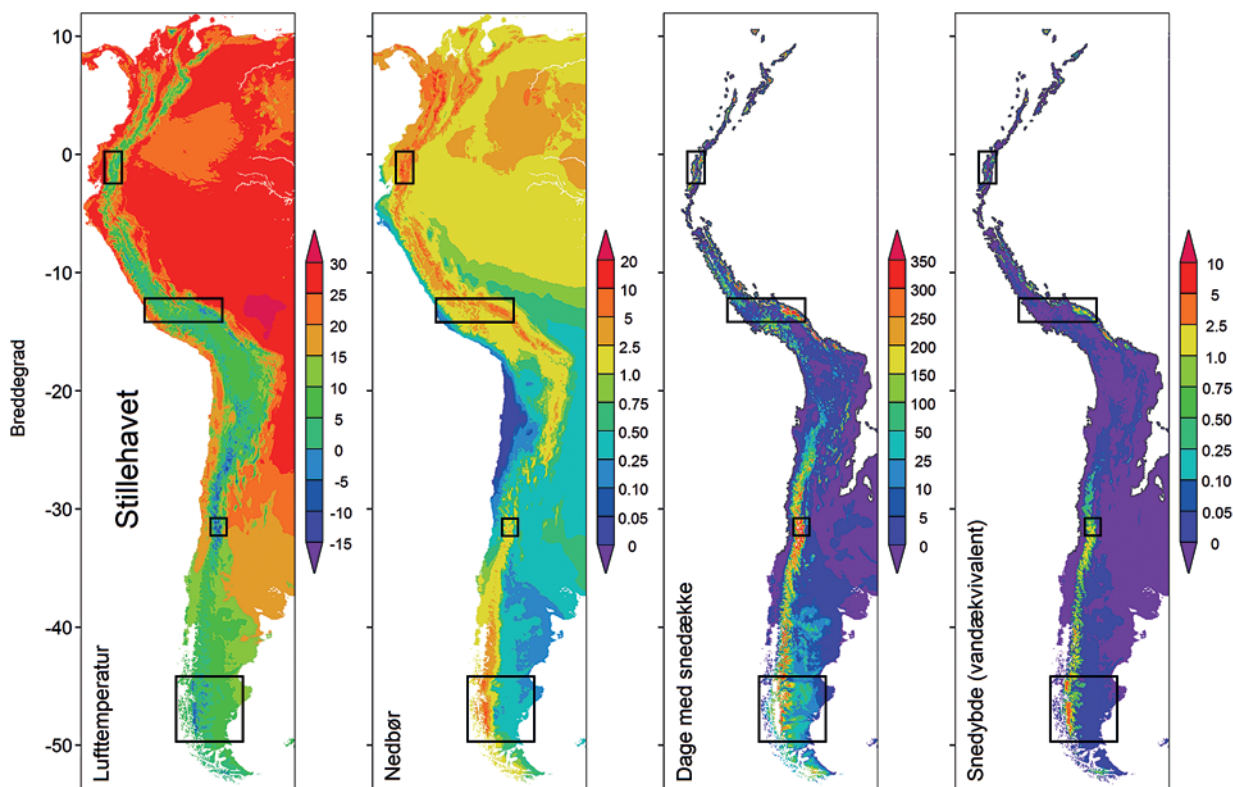
Klimaændringer og afstrømning i Andesbjergene

Resultater viser, at Andesbjergenes klimaforhold er under forandring. Ikke overraskende ses de laveste årsmiddeltemperaturer i de højest beliggende områder af Andesbjergene og de varmeste temperaturer i lavlandet for foden af bjergkæden. Siden 1979 har vi generelt set en opvarmning af Andesbjergene, men i lavlandet øst og vest for bjergkæden har vi derimod set det modsatte – en nedkøling. Samtidig er snesæsonen i gennemsnit kortere nu end i 1979, idet sneen i bjergene falder senere om efteråret og begynder at smelte tidligere på foråret. Enkelte steder i Andesbjergene er den snedækkede sæson blevet op til 2,5 måned kortere. Snearealet er i gennemsnit siden 1979 aftaget med 15 %, og snetykkelsen er i gennemsnit blevet op til 40 cm tyn-

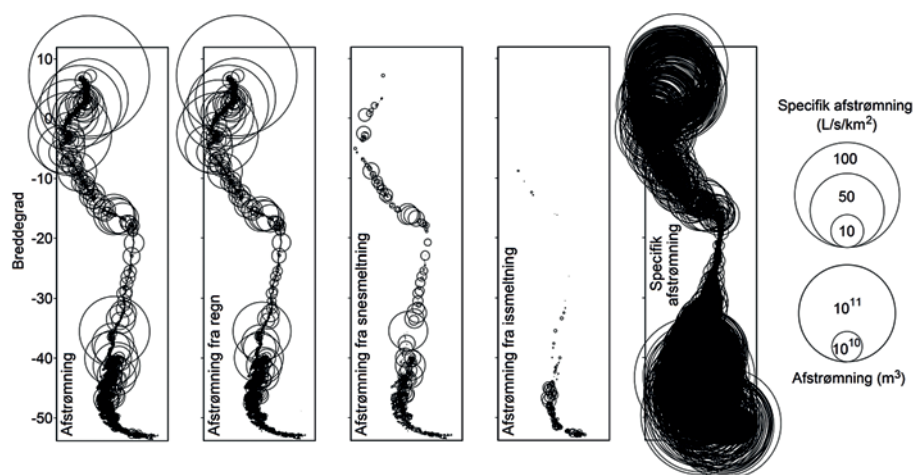
dere pr. årti. I Patagonien vokser både udbredelsen og tykkelsen af sne derimod.

Hvad angår gletscherne er de generelt blevet mindre i areal og volumen siden 1950'erne. Gletscherne beliggende nordøst for Santiago de Chile har i gennemsnit mistet 30 % af arealet siden midten af 1950'erne. Enkelte individuelle gletschere har mistet op imod 60–70 % i areal, samtidig med at de er blevet betydeligt tyndere.

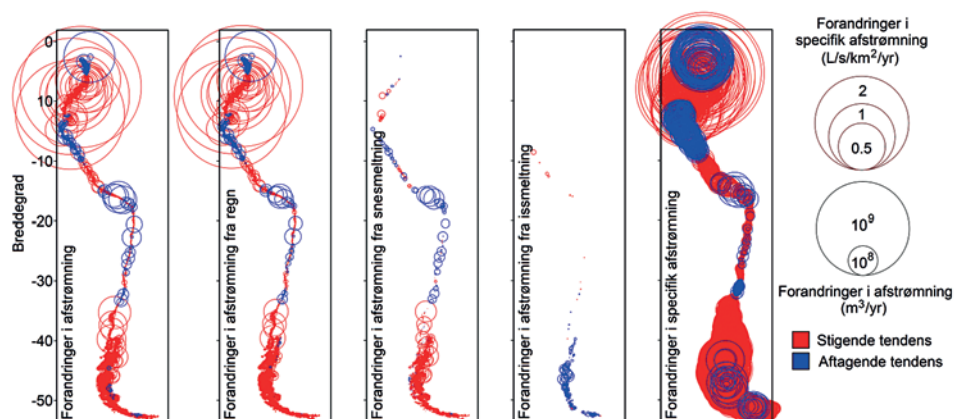
Det er klart, at en reduktion i arealet med sne og gletschere har betydning for områder, hvor man anvender smeltevand. Fx viser vores modelberegninger, at for Chile som helhed stammer omkring 30 % af vandet i vandløbene direkte fra afsmeltningen af sne og gletscheris i Andesbjergene. Et tal, som dækker over betydelige variationer fra



Simuleret gennemsnitlig lufttemperatur, nedbør, dage med snedække og snedybde i Andesbjergene for perioden 1979–2014 foretaget i SnowModel baseret på inputdata fra NASA's klimamodel MERRA. Rektanglerne angiver de omtalte nøgleregioner, som fra nord mod syd er: Quito i Ecuador, Cusco/Lima i Peru, Santiago de Chile i Chile og Patagonien i Chile og Argentina, inklusive de to patagonske isskjolde.



Figuren viser middelf-afstrømningen i perioden 1979–2014 for den vestlige del af Andesbjergene ved udløbet fra hvert individuelt topografisk opland (i alt er der regnet på mere end 4200 oplande med modellen HydroFlow). Der er vist delbidrag fra regn, snesmeltning og isafsmeltning. Ydermere er den specifikke afstrømning vist i liter pr. sekund pr. km².



Figuren viser forandringer i afstrømningsforholdene, hvor et fald i afstrømning er angivet med blå farve og en stigning med rød farve. Cirklerne størrelse er proportional med afstrømningsmængden fra hvert opland.

Videre læsning:

Mernild, S. H. m.fl. 2016. The Andes Cordillera. Part I: Snow Distribution, Properties, and Trends (1979–2014). *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.4804.

Mernild, S. H. m.fl. 2016. The Andes Cordillera. Part III: The Andes Cordillera. Part III: Glacier Surface Mass Balance and Contribution to Sea Level Rise (1979–2014). *Accepted International Journal of Climatology*.

Malmros, J. K. m.fl. 2016. Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955–2013/14. *Journal of Glaciology*, 62(232), 391–401.

Mernild, S. H. m.fl. 2015. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes to the sub-Antarctic islands. *Global and Planetary Change*, 1–11, 10.1016/j.gloplacha.2015.08.009.

Liston, G. E. og Mernild, S. H. 2012. Greenland freshwater runoff. Part I: A runoff routing model for glaciated and non-glaciated landscapes (HydroFlow). *Journal of Climate*, 25(17), 5997–6014.

Resultaterne i artiklen er fremkommet i samarbejde med sneforskere ved henholdsvis Colorado State University og U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory i Fairbanks, Alaska, klimaforskere ved University of Sheffield, og hydrologer og glaciologer ved Universidad de Chile og Universidad de Magallanes.

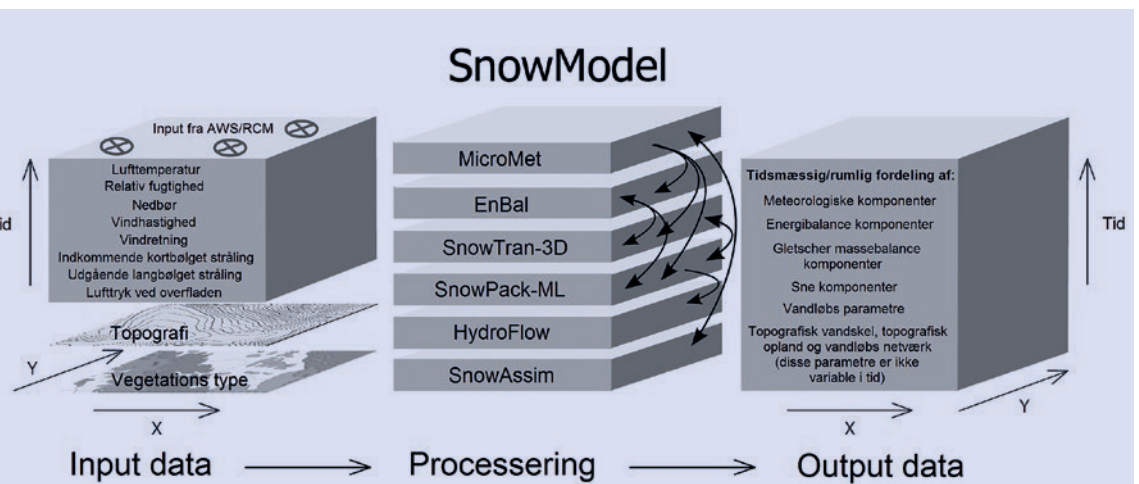


Illustration: Sebastian H. Mernild og Stine H. Pedersen.

Principskitse af modelværktøjet *SnowModel* og dets seks sub-modeller, inklusive input-parametre fra klimastationer (AWS = Automatic Weather Stations) og/eller fra regionale klimamodeller (RCM = Regional Climate Models) og output-parametre.

De sorte pile illustrerer, hvordan de forskellige sub-modeller i *SnowModel* arbejder sammen. *MicroMet* beregner den rumlige variation af meteorologiske parametre (lufttemperatur, nedbør, vindretning, vindhastighed, solindstråling, skydække m.fl.). *EnBal* beregner energi-

balancen i terrænoverfladen, inklusive energibidraget til smeltning af sne og is, fordampling og sublimation fra blandt andet fygesne. *SnowTran-3D* simulerer fordelingen og transporten af fygesne rundt i landskabet. *SnowPack-ML* simulerer densitets-, temperatur- og snedtybdeudvikling over tid og til forskellige dybder i sneen ud fra en multi-lags model. *HydroFlow* simulerer transporten af regn, sne- og issmeltning nedstrøms gennem vandløbssystemet og ved udløb til havet. *SnowAssim* korregerer simulerede tidsserier mod observerede tidsserier.

opland til opland bl.a. afhængig af det procentvise gletscherareal, hvor højt gletscherne ligger og de topografiske forhold. Derudover er der år-til-år-variationer, som afhænger af meteorologiske og atmosfæriske forhold på storskalaniveau i og omkring den tropiske del af Stillehavet. I de relativt tørre år, som er interessante i et vandressourceperspektiv, ses, at afsmeltningen fra sne og gletscheris udgør op mod 60–80 % af den samlede vandmængde i vandløbene omkring og syd for Santiago de Chile.

Den generelle tendens i Sydamerika er, at jo længere nord- og sydpå man bevæger sig væk fra Atacama-ørkenen (som ligger i det nordlige Chile med grænse til Peru), jo mere øges både afstrømningen målt som vandmængden i vandløbene (m^3/s) og den specifikke afstrømning målt som liter

pr. sekund pr. km^2 . Mod nord er afstrømningen domineret af regn fra tropiske klimasystemer, mens sne- og gletscherafsmeltning dominerer afstrømningen mod syd.

Andesbjergenes vandressourcer i fremtiden

Hvis man skal tro FN's klimapanel (IPCC) femte statusrapport, kan vi forvente, at temperaturerne vil forsætte med at stige i fremtiden. Derfor må vi også forvente, at gletscherne i det varmere klima vil fortsætte deres tilbagetog. Det er opskriften på fremtidig vandmangel i de regioner, vi har undersøgt, for på et givet tidspunkt vil gletscherne formindskede areal opveje effekten fra et varmere klima, og afstrømningen af smeltevand fra gletschere vil herefter aftage.

I et vandressourceperspektiv har det stor betydning, hvornår man

rammer et sådant tipping point (i den videnskabelige litteratur kaldet runoff tipping point). Det gælder i særdeleshed for de gletscheroplande, der i dag bidrager med smeltevand til drikkevandsforsyningen, produktionen af elektricitet, osv. langs Andesbjergene. Vi vurderer, at et sådant knæpunkt generelt ligger nogle årtier ud i fremtiden. Men vi kan vi ikke udelukke, at det allerede er passeret i enkelte oplande. Det vil fremtidige simuleringer forhåbentlig give os et mere entydigt svar på – ikke blot for Sydamerika, men også for Himalaya-regionen, Alperne og Skandinavien, hvor smeltevandet udgør en vigtig samfundsressource. ■