

Perspektief vir genestelde klimaatmodellering oor suidelike Afrika

F.A. Engelbrecht en C.J. de W. Rautenbach

Departement Aardwetenskappe, Fakulteit Natuur- en Landbouwetenskappe, Universiteit van Pretoria, Pretoria, 0002

Ontvang 21 Januarie 2000; aanvaar 11 Maart 2000

UITTREKSEL

Die klimaat van suidelike Afrika word wesentlik beïnvloed deur mesoskaal-sirkulasiepatrone wat nie na wense gesimuleer word deur globale atmosferiese algemene sirkulasiemodelle (AASM'e) nie. Die tegniek van genestelde klimaatmodellering (GKM), maak gebruik van hoëroosterresolusie-beperkte-areaalmodelle (BAM'e) om klimaatsimulasies van die mesoskaal te verkry uit oorwegend sinoptiese skaal-AASM-resultate. Hier word die modifiserende invloed van mesoskaalforsing en sirkulasiepatrone op die klimaat van suidelike Afrika uitgelig. Die toepaslikheid van sommige teoretiese aspekte van GKM-tegnieke oor suidelike Afrika word bespreek, en GKM-eksperimente wat reeds oor die streek uitgevoer is, word onder die loep geneem. 'n Benadering wat gevvolg kan word om die klimaat van suidelike Afrika op mesoskaal te modelleer, word voorgestel. .

ABSTRACT

Perspective for nested climate modelling over southern Africa

The climate of southern Africa is fundamentally affected by mesoscale circulation patterns that are not adequately simulated by global atmospheric general circulation models (AGCMs). The technique of nested climate modelling (NCM) utilises high-resolution limited area models (LAMs) to obtain climate simulations of the mesoscale from essentially synoptical scale AGCM results. This study outlines the modifying influence of mesoscale forcing and circulation patterns on the southern African climate. The applicability of certain theoretical aspects of NCM techniques for the southern African subregion is discussed, and NCM experiments already performed over the region are highlighted. An approach that may be followed to model the climate of southern Africa on the mesoscale is proposed.

INLEIDING

In Suid-Afrika is daar 'n toenemende besef onder die wetenskaplike gemeenskap, beleidmakers en die publiek dat toekomstige globale klimaatsverandering ingrypende gevolge vir suidelike Afrika kan hê. Globale klimaatsverandering word onder meer voorsien weens die wêreldwye toename in konsentrasiës van sommige kweekhuisgasse in die atmosfeer,¹ asook die vernietiging van reënwoude.^{2,3} Ook oor suidelike Afrika kan die moontlike verskuiwing van klimaatsones en meer gerealde vloede, droogtes en hittegolwe lei tot maatskaplike, ekonomiese en politieke ontwrigting.⁴ Modellering van die toekomstige klimaat op streekskaal is dus van die allergrootste belang.

Om klimaat op streekskaal te modelleer, behels die simulasie van klimaat-forserende meganismes op twee verskillende ruimtelike skale: Die grootskaal, wat strek van 'n paar honderd km tot globaal en die mesoskaal, gedefinieer as 'n paar kilometer tot ongeveer 100 km.⁵ Grootskalse forserings, soos dié veroorsaak deur die roterende aarde en die volophed van atmosferiese gasse, beheer globale sirkulasie. Die globale sirkulasie bepaal weer die opeenvolging van weergebeurtenisse wat die klimaat van 'n sekere streek tipeer. Mesoskaalforsings soos geïnduseer deur komplekse topografie en oppervlakteienskappe, modifiseer die struktuur van weergebeurtenisse en lei tot mesoskaal-sirkulasies. Binne die grootskalse sirkulasiesisteme dra hierdie sirkulasies daartoe by om die streeksverspreiding van klimaatsveranderlikes te bepaal.⁵

Globale atmosferiese algemene sirkulasiemodelle (AASM'e), wat driedimensionele voorstellings van die atmosfeer bied, is tans die vernamste metode om die klimaat te simuleer.⁵ Alhoewel AASM'e die hooffeienskappe van die gemiddelde atmosferiese sirkulasie, asook die interjaarlikse veranderlikheid in die atmosferiese sirkulasie oor suidelike Afrika relatief goed weergee,^{6,7,8} is simulasies van plaaslike klimate onbevredigend. Hierdie resultaat kan grotendeels toegeskryf word aan die relatief lae horison-

tale roosterresolusie van die globale AASM'e wat vir die klimaat-simulasies gebruik is. Vir hedendaagse klimatologiese toestande, met vaste grootskaalforsing, is die CSIRO9 MARK II AASM van Australië byvoorbeeld geloop met spektrale roosterresolusies van R21 (3.2° by 5.6°) en T63 (1.87° by 1.87°). Die berekenings vereistes wat globale numeriese klimaatmodellering aan rekenaarkapasiteit stel, is sekerlik die hoofrede waarom globale AASM-klimaatsimulasies nie op mesoskaal-roosterresolusies uitgevoer kan word nie. Die aard van klimaatsimulasies vereis dat die AASM'e vir lang integrasietydperke (wat kan wissel van maande tot jare) geloop word, sodat kragtiger rekenaars vereis word namate die roosterresolusie van modelle fyner word.^{5,9} Gekoppelde oseaan-see-ys-atmosfeer-modelle word geloop met selfs growwer resolusies as hedendaagse AASM'e, en sluit slegs hoogs vereenvoudige weergawes van hidrosferiese en kryosferiese komponente in. Hierdie modelle moet vir lang simulatieperiodes geloop word voordat die verskillende komponente 'n toestand van ewewig bereik.⁵ Geen gekoppelde klimaatmodelsimulasie is tot op hede in Suid-Afrika uitgevoer nie weens die gebrek aan die beskikbaarheid van superrekenaars om die uiters tydrowende numeriese integrasies te voltooi.

Met tipiese AASM-roosterresolusiesimulasies kan die effek van sinoptiese-skaal-forserings op die algemene atmosferiese sirkulasie wel vasgevang word, maar belangrike kleiner skaal atmosferiese verskynsels, soos tropiese sikkone, kan nie na wense as subroosterskaal-prosesse geparameteriseer word met hierdie resolusie nie. Ook die impak van lokale forserings wat voortspruit uit byvoorbeeld komplekse topografie en aardoppervlakteienskappe, en wat die veranderlikheid van die klimaat oor groot dele van suidelike Afrika sterk beïnvloed, gaan verlore. Die onvermoë om mesoskaal atmosferiese veranderlikheid in globale AASM-simulasies vas te vang, affekteer in 'n mate ook simulasies van die atmosfeer deur AASM'e op groter ruimtelike skale.^{5,9}

Klimaatsveranderingimpak-analises wat oor suidelike Afrika

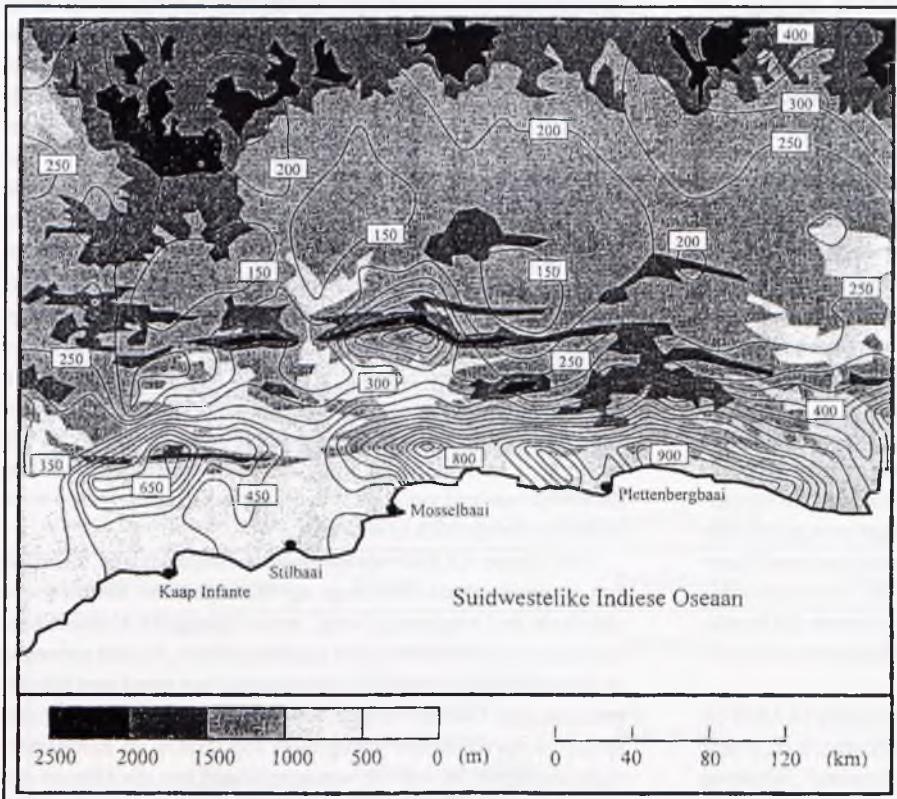
uitgevoer is, het hoofsaaklik gebruik gemaak van klimaatsneigings soos gesimuleer deur laeresolusie-AASM's.¹⁰ Die gebrek aan fyner besonderhede in hierdie analises het 'n nadelige uitwerking op die beraamde impak van klimaatsverandering in streekverband (oor suidelike Afrika). Die probleem om meer detail in die klimaatsimulasie oor die streek te verkry, uit laeresolusie-AASM-resultate, moet dus aandag kry.

Die tegnick van genestelde klimaatmodellering (GKM), waar gebruik gemaak word van hoëroosterresolusie-beperkte-areaalmodelle (BAM's), is een moontlike benadering wat gevolg kan word om laasgenoemde probleem op te los. Die tegnick kom daarop neer dat 'n hoëroosterresolusie-BAM van randwaardes voorsien word deur 'n globale AASM, terwyl beide modelle vir verlengde periodes geïntegreer word ten einde klimaatsimulasies te verkry.

In hierdie artikel word die modifiserende invloed van mesoskaalforskering en sirkulasiepatrone op die klimaat van suidelike Afrika kortlik bespreek. Dit word gevolg deur 'n bekrywing van die GKM-tegniek waar gepoog word om mesoskaaleffekte in modelsimulasies vas te vang. Laastens word GKM-eksperimente, wat reeds oor die subkontinent uitgevoer is, bespreek. Die doelwit van hierdie artikel is dus om 'n aanduiding te gee van die toepaslikheid van sommige teoretiese aspekte van GKM-tegnieke op suidelike Afrika. 'n Voorgestelde benadering om die klimaat van die subkontinent op mesoskaal te modelleer, word aangebied, met die oogmerk om verdere bespreking onder die modelleringsgemeenskap aan te moedig.

MESOSKAALFORSERING OOR SUIDELIKE AFRIKA

Mesoskaal atmosferiese forsering word hoofsaaklik veroorsaak deur die komplekse verspreiding van oppervlakeienskappe soos orografie, kuslyne, binnelandse watermassas en plantegroei. Hierdie cienskappe varieer op 'n ruimtelike skaal van sowat 10 tot 100 km.⁵



Figuur 1: Orografie (skadu met 500 m intervalle) oor die Klein-Karoo en Suidkus (20° tot 25° Oos en 32° tot 35° Suid) en isohiëte van die gemiddelde jaarlikse totale reënval gemeet in millimeter (mm). Let op die toename in plaaslike reënvaltotale teen die hellings van en oor hoë orografie.

Reënval word onder meer sterk beïnvloed deur die orografie (byvoorbeeld kondensasie vanweë orografiese oplifting). Figuur 1 illustreer die orografie en waargenome gemiddelde jaarlikse reënval oor die Klein-Karoo en die Suidkus (20° tot 25° Oos en 32° tot 35° Suid). Betreklik droë toestande heers oor die Klein-Karoo wat in die reënskadu van die Lange- en Outeniquaberge lê, terwyl hoër plaaslike reënvaltotale voorkom teen die hellings van, of oor gebiede met groter hoogtes bo seespieël. Figuur 1 beklemtoon die verskynsel dat groot veranderings in reënvaltotale oor redelike klein afstande kan voorkom.

Mesoskaalforskering kan ook van termiese oorsprong wees, soos veroorsaak deur verskille in die verhitting van land- en oseaanmassas. Op hierdie wyse ontstaan land-seebriessirkulasies wat die plaaslike klimaat van kusgebiede wesenlik kan beïnvloed. Aan die noordweskus van Madagaskar vorm land-seebriessirkulasie die dominerende wind.¹¹ Die sterkste seebries in suidelike Afrika kom aan die Namibiese kus voor, wat gekenmerk word deur sterk temperatuurgradiënte tussen die oseaan en land. Hierdie bries, vanaf die suid-suidweste, waai veral gedurende middae wat volg op kalm en oortrokkeoggende.¹¹ Gedurende die somer word vogtige, relatiewe koel lug byna daagliks oor die Nataalse kus geadvanteer deur 'n seebries, soms sover as 60 km die binneland in.¹² Seebriessirkulasies word meestal beïnvloed deur gradiëntwinde van groter skaal druksysteme oor die see (figuur 2), en die gekombineerde effek van hierdie winde bepaal die rigting van inbringing van die seebries oor die binneland van Natal.¹² Die sterk hellende orografie (Drakensberge) veroorsaak voorts die ontstaan van 'n bergvlaktewind gedurende die nag en valleiwinde gedurende die dag.^{13,14} Wanneer die gradiëntwinde, hellingsirkulasies en landsseebries-sirkulasies in interaksie tree, kan dit lei tot komplekse dinamiese vloekpatrone in die mesoskaal.

Groot binnelandse watermassas, soos byvoorbeeld die Victoriameer, het 'n noemenswaardige effek op die plaaslike atmosferiese sirkulasie en beïnvloed ook die klimaat van die omliggende gebiede. Die meer is geleë op die ewenaar in 'n vallei tussen twee bergreeks. Die unieke orografiese cienskappe skep intense mesoskaalsirkulasiepatrone met sterk daaglikse siklusse in temperatuur en reënval. Daar word vermoed dat donderstormfrekwensies oor die Victoriameer van die hoogste in die wêreld is.¹⁵

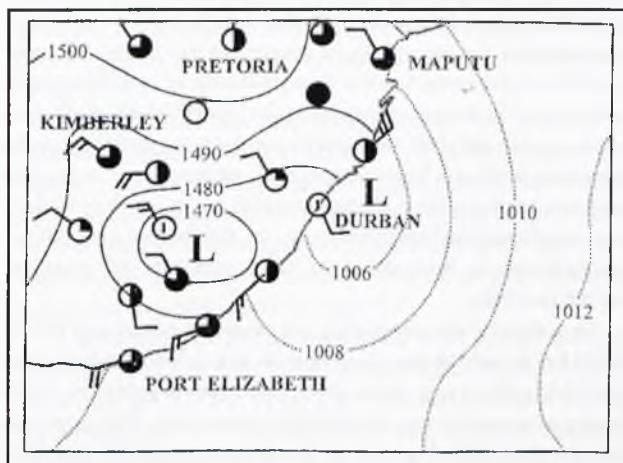
Interaksies tussen meso- en sinoptiese-skaal-sirkulasiepatrone beïnvloed ook die klimaat oor sekere dele van suidelike Afrika. So byvoorbeeld is die voorkoms van swaar, lokale donderstorms oor die platorand van Mpumalanga en die Noordelike Provincie die produk van minstens drie skale van beweging in die atmosfeer.¹⁶ Op sinoptiese skaal word 'n weswaartsbewegende trog op of bo die 850 hPa-drukvlak geproduceer, wat westelike tot noordwestelike vloei oor die noordoostelike platorand versterk. Op die mesoskaal vorm 'n dekselinversie oor die platorand deur of adveksie, of subsidensie, van Hoëveld-lug (figuur 3). Plaaslike invloede versterk die lugvloei oor die platorand (sowel die 850 hPa westelike vloei as die oppervlak oostelike vloei van

vogtige Laeveld-lug). Die oppervlak oostelike vloei wat die 850 hPa westelike vloei (afkomstig van die Hoëveld) ondersny, is waarskynlik van die sinoptieseskaal- en mesoskaalvloei (platorandverhitting) afhanglik.¹⁶ Indien die indring van vogtige Laeveld-lug na die platorand vroegtydig, en ver genoeg na wes plaasvind, kom swaar konvektiewe storms voor oor gebiede waar geen dempende inversie deur subsidensie of adveksie gevorm is nie.

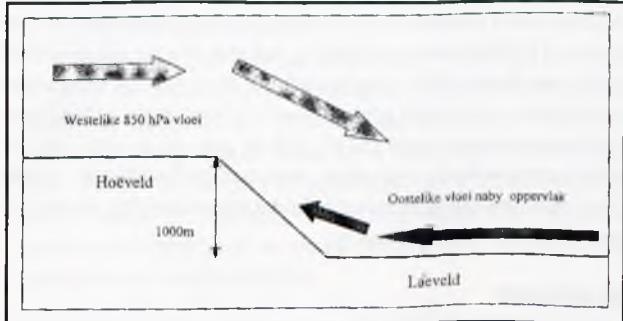
Hierdie voorbeeld illustreer onteenseglik die behoeftie aan hoëroosterresolusie (mesoskaal)-informasie. Alhoewel globale AASM'se met growwe roosterresolusies in staat is om inligting te verskaf rakende grootskaalse sirkulasiepatrone oor suidelike Afrika, is hierdie modelle nie gesik om mesoskaalpatrone, soos bespreek in hierdie afdeling, suksesvol te simuleer nie.

GENESTELDE KLIMAATMODELLERING

As 'n alternatief vir growweroosterresolusie-AASM-klimaat-simulasies is dit moontlik om gedetailleerde klimaatsimulasies vir beperkte areas van die aarde te verkry deur middel van 'n tegniek wat bekend staan as genestelde klimaatmodellering (GKM). GKM behels die nes van 'n hoëroosterresolusie-BAM binne die ruimtelike roosterveld van 'n AASM. Die AASM verskaf rand- en beginwaardes aan die BAM, wat met 'n hoëroosterresolusie (van 10-100 km), in staat is om sommige mesoskaaleienskappe van die atmosfeer te simuleer. Dit kan lei tot 'n meer realistiese uitbeelding van 'n spesifieke streek se



Figuur 2: Gradiëntwinde soos geïnduseer deur 'n kuslaag oor die Indiese Oseaan kan die indring van die seebries oor die Nataalse binneland verdiep. Die figuur toon geopotensiële hoogtes (gpm) van die 850 hPa-drukvlak oor die land (soliede kontoere) en isobare (stippellyne) gereduseer tot gemiddelde seevlakdruk (hPa) oor die oseaan, soos op 14 Januarie 1968 om 14:00.

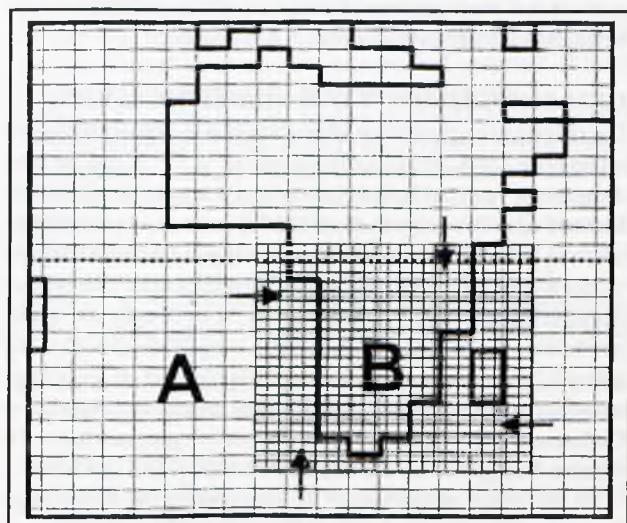


Figuur 3: Interaksie tussen sinoptiese en mesoskaalvloei relatief tot die noordoostelike platorand van Suid-Afrika. Hierdie vloei kan lei tot die ontwikkeling van swaar donderstorms (gebaseer op Garstang en ander¹⁶).

klimaat. Die nestelmetode kan toegepas word deur 'n nie-interaktiewe (een-rigting) of interaktiewe (twee-rigting) wyse. Eersgenoemde word voorgestel in figuur 4 wat daarop dui dat inligting afkomstig van die laeroosterresolusie-ΑΑSM gebruik word om die hoëroosterresolusie-BAM aan te dryf. Let daarop dat inligting van die BAM nie teruggevoer word na die laeroosterresolusie-gebied van die ΑΑSM nie. Die interaktiewe metode (inligting vloei interaktief in beide rigtings tussen die hoë- en laeroosterresolusiemodelle) is moeilik haalbaar wanneer die globale ΑΑSM spektrale velde analyseer, terwyl die genestelde model slegs roosterveldanalises uitvoer.⁹ Indien die globale model 'n klimaatmodel is, kan willekeurige terugvoer van inligting vanaf die BAM nadelig dien as 'n kunsmatige bron of put van energie, en sodoende die behoudseisenskappe van die ΑΑSM omverwerp.⁹

Tydens die ontwikkeling van 'n genestelde klimaat-BAM is dit noodsaaklik om die area van belang sowel as die dimensies van die horizontale roosterresolusie te definieer. Die roosterresolusie moet fyn genoeg wees om die relevante mesoskaalsirkulasiepatrone vas te vang, terwyl die area van belang groot genoeg moet wees om te verhoed dat die laeroosterresolusierandwaardes die oplossing oor die totale area domineer. Die BAM-gesimuleerde mesoskaal-sirkulasiestelsels moet dus ten volle binne die gekose gebied kan ontwikkel.^{17,18} Dit is voorts waarskynlik dat die interne BAM-fisika se belangrikheid toeneem namate die BAM-gebied vergroot. Dit vergroot die moontlikheid dat die BAM moontlik grootskaalse foute, soos gesimuleer deur die globale ΑΑSM, kan modifiseer.⁵ Aan die ander kant is daar gevind dat die beperkte gebied vir die BAM klein genoeg moet wees om te verseker dat die interne sinoptieseskaal-sirkulasiepatrone nie afwyk van die van die aandrywende ΑΑSM nie.^{17,18} Die aantal roosterpunte vir die BAM moet ook nie so groot wees dat die modelsimulasies berekeningsgewys te duur word nie. 'n Middeweg moet dus gevind word tussen die roosterresolusies wat benodig word en die beskikbare rekenarkapasiteit.

Die toepassing van een-rigting-BAM'se op mesoskaalklimaatmodellering berus op die aanname dat die ontwikkeling van sisteme binne die genestelde modelgebied beperk word deur forsering van randwaardes vanaf die ΑΑSM. Die invoer van



Figuur 4: Die roosterblokresolusie van 'n tipiese globale atmosferiese model oor Afrika. 'n Fyn resolusiebeperkte areamodel (B) word binne die globale modelrooster (A) genestel. Inligting word toegelaat om vanaf die globale model oor die wande van die fyner resolusiemodel te vloei gedurende die modelintegrasies, maar vloei in die teenoorgestelde rigting word nie toegelaat nie.

randwaardes dien ten doel om vloei-onversoenbaarhede te verwyder, veral in gebiede waar weersisteme gereeld deur die gebied beweeg.¹⁹ In die trope, waar weersisteme normaalweg stadiger beweeg as in middelbreedtegebiede, is dit moontlik dat semistasionêre sisteme binne die genestelde gebied kan ontwikkel met 'n lewensiklus onafhanklik van die AASM-forsering.²⁰ Die eenrigting-nestingmetode het dus teoretiese beperkings in die trope, en die GKM-tegniek sal moontlik beter vaar in die middelbreedtes. Dic vraag ontstaan of hierdie "stasionêre probleem" die GKM-tegniek ontoepasbaar maak vir groot dele van suidelike Afrika wat gedomineer word deur tropiese sirkulasiestelsels. 'n Goeie aanduiding dat die GKM-tegniek wel toepasbaar is, word verskaf deur suksesvolle GKM-simulasies van die Australiese klimaat, wat oor uitgebreide gebiede noord en suid van die ewenaar uitgevoer is.²¹

Dit is ook noodsaaklik om Madagaskar in 'n beperkte gebied in te sluit wanneer klimatsimulasies oor suidelike Afrika uitgevoer word. Detail van die Madagaskar-orografie word nie voldoende geïnkorporeer in die gladgemaakte velde van AASM's nie. Dit kan die AASM-simulasies van byvoorbeeld Mosambiekse sirkulasiepatrone moontlik nadelig raak.²¹

'n Goeie aanbeveling is ook dat die rande van 'n BAM ver van die subkontinent se kuslyne gekies word, sodat interpolasie vanaf die AASM na die BAM makliker uitgevoer kan word (die BAM en AASM simuleer die skeidingsvlak tussen land en oseaan met verskillende roosterresolusies).

'n Voorverciste vir die suksesvolle simulasie van streeks-klimate deur die GKM-tegniek is uiteraard dat die aandrywende sinoptieskaal-AASM-simulasies realisties moet wees. Indien die eienskappe van hierdie klimaat, soos die migrasie van antisiklone en afsnylae oor suidelike Afrika of die posisie van die intertropiese (interoseaan) konvergensiesone onrealisties voorkom, is dit hoogs onwaarskynlik dat die BAM foute sal korrigeer. Dit is dus nodig om die sinoptieskaal-klimatologie van die AASM deeglik te toets.^{5,7} 'n Belangrike verskynsel wat uit GKM-eksperimente na vore tree,⁵ is dat die gemiddelde sinoptieskaal-klimatologie van 'n BAM normaalweg goed vergelyk met dié van die aandrywende AASM. Dit is 'n aanduiding dat, ten minste met die eenrigting-benadering, 'n BAM nie foute in die laeroosterresolusie aandrywende sirkulasiepatrone sal korrigeer nie. Hierdie resultaat beklemtoon die belangrikheid van bevredigende AASM-velde.

GKM-EKSPERIMENTE OOR SUIDELIKE AFRIKA

Die enigste twee genestelde klimatsimulasie-eksperimente wat tot op hede oor suidelike Afrika uitgevoer is,^{21,22} is gedoen deur die gebruik van DARLAM (Division of Atmospheric Research Limited Area Model) van die CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) in Australië. Hierdie model is ontwikkel vir sowel mesoskaalstudies as klimaatsveranderingseksperimente.²⁰ Die model is 'n twee-tydvlak, semi-implisierte, hidrostatiese, primitiewe vergelykingsmodel. Dit gebruik 'n Arakawa afwisselende C-roosterveld en semi-Lagrange horizontale adveksie met bikubiese ruimtelike interpolasie. Gedurende die eksperimente is die model genestel binne 'n vroeëre weergawe van die CSIRO9 MARK II (R21) AASM.⁷

In die eerste eksperiment²¹ is daar gepoog om die huidige Januarie-klimaat oor suidelike Afrika te simuleer. Die eksperiment het bestaan uit twintig Januarie-simulasies genestel teen 'n roosterresolusie van 125 km binne die CSIRO9 MARK II (R21) AASM. Die gevolgtrekking is gemaak dat DARLAM 'n meer akkurate simulasie van die klimaat oor suidelike Afrika verskaf as die AASM. Oor die steil platorand van oostelike Suid-Afrika simuleer DARLAM egter meer reënval as die AASM, waarvan die simulasies alreeds die waargenome reënval

oorskry.^{6,7}

In die tweede eksperiment²² is DARLAM gebruik om die volle seisonale klimaatsiklus van suidelike Afrika in 'n 10 jaar-simulasie te simuleer. Weereens is daar gevind dat DARLAM die reënval oor die oostelike dele van Suid-Afrika oorskot. Ten spyte van hierdie probleem het DARLAM, relatief tot die AASM, 'n merkbare verbetering in die simulasie van die mesoskaalklimaat verskaf. Daar word vermoed dat DARLAM se semi-implisierte, semi-Lagrange-integrasieskema vertikale snelhede in die teenwoordigheid van skerp orografiese gradiënte oorskot. Dit kan moontlik die oorskotting van reënval oor die suidoostelike platorand verklaar, en dui daarop dat verbetering in die simulasie van streeksreënvaltotale alleen moontlik sal wees indien die BAM verder verbeter sou word.²²

GEVOLGTREKKINGS EN VOORSTELLE

Vorige resultate van DARLAM oor sowel suidelike Afrika en Australasië is bemoedigend, en dui daarop dat DARLAM die potensiaal het om betekenisvolle verbeterings aan te bring aan die simulasie van mesoskaal klimatologiese besonderhede. Omdat die GKM-tegniek fisies, en nie empiries gebaseer is nie, kan 'n soortgelyke verbetering verwag word wanneer klimatologiese toestande wat verskil van die teenswoordige gesimuleer word.

Alhoewel die GKM-tegniek groot belofte inhoud vir hoë-roosterresolusie-klimatsimulasies oor suidelike Afrika, is dit steeds in 'n ontwikkelingsfase. Huidige BAM's het bekende tekortkominge in fisiese parameteriserings (konveksie en fisiese prosesse aan die oppervlak) en numeriese algoritmes (byvoorbeeld die berekening van die drukgradiëntkrag in hidrostatiese modelle). Hierdie tekortkominge affekteer BAM-klimatsimulasies, en daarom is dit noodsaaklik om die mees gesikte fisiese parameteriserings te kies en die modelkonfigurasie vir 'n gegewe studie te verifieer. So is dit byvoorbeeld nodig om deur middel van sensitiviteitseksperimente vas te stel watter parameteriseringskema vir konveksie die mees gesikste sal wees vir suidelike Afrika.

In vorige klimatsimulasies oor suidelike Afrika met DARLAM het dit geblyk noodsaaklik te wees om Madagaskar binne die BAM-gebied in te sluit, terwyl die beperkte gebied se rande so ver as moontlik van die kuslyne moes wees. Eksperimente wat oor Australië uitgevoer is, het aangegetoon dat dit moontlik sal wees om gebiede binne die trope in die beperkte gebied in te sluit sonder dat die "stasionêre probleem" die simulasie wesenlik sou besoedel.

Huidige planne vir die DARLAM genestelde modellerings-raamwerk oor suidelike Afrika behels intensieve model-verifikasiëring deur gebruik te maak van teenswoordigetyd-klimatologiese data. Daar word beoog om die model te loop met 'n horizontale roosterresolusie van ongeveer 40 km. Die outeurs beplan voorts om deur middel van numeriese eksperimente vas te stel of DARLAM se oorskotting van reënval oor die oostelike helfte van Suid-Afrika toegeskryf kan word aan die numeriese skema wat in die model gebruik word vir vogadveksie. Medium-termyn-doelwitte is om DARLAM te gebruik as deel van 'n hoë-roosterresolusie seisoenale reënvoorspellingskema, asook om kweekhuisgas-geïnduseerde klimaatsverandering scenario's oor suidelike Afrika te verkry.

SUMMARY

Future changes in global climate may cause dramatic changes in the climate of southern Africa. Shifting climate zones and more frequent storms, droughts, floods and heatwaves may lead to social, economical and political disruptions.⁴ Modelling future climate on a regional scale is therefore an issue of funda-

mental importance.

Atmospheric general circulation models (AGCMs) have become the primary method for simulating climate.⁵ AGCMs capture the main characteristics of and interannual variation in the general circulation over southern Africa satisfactorily.^{6,7,8} However, their simulations of climate on a regional scale are meagre. The main reason for this result is the low horizontal grid resolution of AGCMs.^{5,9} Computational requirements prevent AGCMs to be run at mesoscale grid-resolutions of a few kilometres to about 100 km.^{5,9} The impact of local forcings such as complex orography, and important small-scale circulations such as tropical cyclones and land-sea breezes cannot be resolved properly at typical AGCM grid resolutions^{5,9}. However, mesoscale forcings and circulations have an important modifying influence on the southern African climate. For example, the complex orography of the Klein Karoo area, Lake Victoria¹⁵, and land-sea breezes^{11,12,13,14} all contribute to local-scale modifications of the southern African climate (Figures 1 and 2). The climate of the north-eastern escarpment areas of South Africa is significantly influenced by interactions between mesoscale and synoptic-scale circulations (Figure 3).

The technique of nested climate modelling (NCM) can be used to obtain detailed climate simulations over limited areas of the earth. NCM involves the nesting of a high grid-resolution limited area model (LAM) within the AGCM over the area of interest. The AGCM supplies the LAM with initial and boundary conditions. With a grid resolution of 10-100 km, the limited area model is able to simulate some of the mesoscale properties of the circulation. The one-way nesting procedure is depicted in Figure 4.

The LAM domain should be large enough for mesoscale circulations to develop fully within it,^{17,18} yet small enough to prevent the LAM simulation from diverging from the AGCM simulation on the synoptic-scale.^{17,18} The LAM grid resolution should be fine enough for the mesoscale circulations to be captured. A compromise has to be reached regarding the grid resolution required and available computer power.

It is necessary to include Madagascar in a LAM domain over southern Africa, since the topographical fields of typical AGCMs do not resolve the island properly.²¹ It is also advisable to place the boundaries of the limited area far away from the coastlines of the subcontinent.

Previous NCM experiments over southern Africa utilised the Division of Atmospheric Research Limited Area Model (DARLAM), nested within the CSIRO9 MARK II (R21) AGCM. Compared to the AGCM, DARLAM provided a more accurate and detailed simulation of southern African climate.²¹ However, the rainfall simulated by DARLAM over the eastern parts of South Africa is too high.²¹ It is speculated that this overestimation results from the overestimation of vertical velocities in regions of steep orography.²²

It was concluded that the technique of NCM has enormous potential for improving the simulation of present and future climate over South Africa. However, the technique is still in its developing stage. Experiments have to be conducted to determine which numerical and parameterisation schemes are the most suitable for southern African conditions. The authors intend to use DARLAM to obtain scenarios of future climatic patterns over southern Africa.

BEDANKINGS

Die outeurs bedank graag die Waternavorsingskommissie wat die navorsing met DARLAM finansieel ondersteun. In die besonder word dr. Green bedank vir sy volgehoue belangstelling en aanmoediging.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Delworth, T.L., Mahlman, J.D., Knutson, T.R. (1999). Changes in heat index associated with CO₂-induced global warming, *Climate Change*, 43, 369-386.
2. Bazzaz, F.A. (1998). Tropical forests in a future climate: Changes in biological diversity and impact on the global carbon cycle, *Climate Change*, 39, 317-336.
3. Nobre, C.A., Sellers, P.J., Shukla, J. (1991). Amazonian Deforestation and Regional Climate, *J. Climate*, 4, 957-988.
4. Rowlands I.H. (1998). *Climate change cooperation in Southern Africa* (Earthscan Publications Limited, London, UK).
5. Giorgi, F., Mearns, L.O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: A review, *Rev. Geophys.*, 29, 191-216.
6. Joubert, A.M. (1997). Simulations by the atmospheric intercomparison project of atmospheric circulation over southern Africa, *Int. J. Climatol.* 17, 1129-1154.
7. Rautenbach, C.J. de W., Engelbrecht, F.A. (2000). Klimaatevaluasies van die CSIRO-9 Merk II (R21) globale atmosferiese algemenesirkulasie-model. Inguedien by *Die Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie*.
8. Engelbrecht, F.A., Rautenbach, C.J. de W. (2000). The contribution of extra-tropical sea-surface temperature anomalies to the 1996/97 model simulated rainfall and mean sea-level pressure over South Africa and adjacent oceans. Inguedien by *Water SA*.
9. McGregor, J.L., Walsh, K.J., Katzfey, J.J. (1993). *Nested Modelling for regional Climate Studies. Modelling Change in Environmental Systems* (John Wiley and Sons Ltd.) Chapter 15 pp. 376-386.
10. Joubert, A.M., Mason, S.J., Galpin, J.S. (1996). Droughts over southern Africa in a doubled-CO₂ climate, *Int. J. Climatol.*, 16, 1149-1156.
11. Jackson, S.P. (1954). Sea breezes in South Africa, *S.A. Geogr. Jour.*, 36, 13-23.
12. Preston-Whyte, R.A. (1969). Sea breeze studies in Natal, *S.A. Geogr. Jour.*, 51, 38-48.
13. Tyson, P.D. (1966) Examples of local air circulations over Cato Ridge during July 1965, *S.A. Geogr. Jour.*, 48, 13.
14. Tyson, P.D., (1968) Southeasterly winds over Natal, *J. for Geogr.*, 111, 237-246.
15. Asnani, G.C. (1993). *Tropical Meteorology* (Punc, India).
16. Garstang, M., Kelbc, B.E., Emmitt, G.D., London, W.B. (1987). Generation of Convective Storms over the escarpment of Northeastern South Africa, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 429-443.
17. Jones, R.G., Murphy, J.M., Noguer, M. (1995). Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 1413-1449.
18. Podzun, R., Cress, A., Majewski, D., Renner, V. (1995). Simulation of European Climate with a limited area model. Part II. AGCM boundary conditions, *Contrib. Atmos. Phys.* 68, 205-225.
19. Errico, R., Baumhefner, D. (1987). Predictability experiments using a high resolution limited-area model, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 408-418.
20. Walsh, K., McGregor, J.L. (1995). January and July Climate simulations over the Australian region using a limited area model, *J. Climate*, 8, 2387-2403.
21. Joubert, A.M., Katzfey, J.J., McGregor, J.L., Nguyen, K.C. (2000). Simulating mid-summer climate over Southern Africa using a nested regional climate model, Inguedien by *J. Geophys. Res.*
22. Joubert, A.M., Katzfey, J.J., McGregor, J.L. (2000). Daily rainfall simulations over South Africa using a nested regional climate model. Inguedien by *S. Afr. J. Sci.*