

Bennie Mols

Kijkduinstraat 121-2

1055 XW Amsterdam

bmols@orange.nl

Studiegroep Wiskunde met de Industrie 2007

Meer gewas in gesloten kas

In een nieuw type tuinbouwkas kunnen zowel warmte als kou onder de grond worden opgeslagen en hoeven de ramen nooit meer open. De vraag wordt hoe de tuinder de klimaatregeling in de kas zo efficiënt mogelijk kan regelen.

Een gewone tuinbouwkas heeft een simpele klimaatcontrole. Met de verwarmingsketel regel je de warmtetoever, en de koeling regel je door de ramen open of dicht te doen. Als het koud is, zijn de ramen dicht en staat de ketel aan. Als de zon gaat schijnen, gaat de ketel uit. Maar dan kan het al snel te warm worden in de kas, en moeten de ramen open. In een tuinbouwkas is eerder de koeling een probleem dan de verwarming.

Een bijkomende complicatie is dat de plant water verdampt om zichzelf te koelen. Dat vocht hoopt zich in de kas op. Wordt de kas nu te vochtig, dan moeten de ramen open. Zo kan het gebeuren dat in een gewone kas zowel de verwarming aan moet — omdat het buiten koud is — als de ramen open — omdat de kas anders te vochtig wordt. Om de kas niet te vochtig te laten worden, verbruikt hij dus veel energie.

Adviesbureau Ecofys — gespecialiseerd in duurzame energie, energiebesparing en klimaatbeleid — vermoedde dat het energieverbruik van een kas efficiënter moest kunnen en bedacht het idee van een gesloten kas. Het basisidee is om de ramen voortdurend dicht te houden, en de warmte of koude niet weg te gooien, maar op te slaan en te gebruiken als

het nodig is. Gebruik 's zomers de kou die je 's winters hebt opgeslagen en omgekeerd. Zo kunnen de ramen dicht blijven, wat als extra voordeel heeft dat de concentratie koolstofdioxide hoger wordt, waardoor de planten nog beter groeien. Zonlicht, temperatuur, vochtigheid en koolstofdioxidegehalte bepalen samen hoe de plant groeit.

De warmte wordt in de grond opgeslagen in een warmtebron, en de koude in een aparte koudebron. De bronnen liggen typisch enkele honderden meters uit elkaar en zijn zo'n honderd meter diep. In beide gevallen is de bron een *aquifer*: een poreuze zandlaag met daarin water, afgeschermd door een ondoordringbare kleilaag. 's Zomers kan er koud water uit de koudebron worden gepompt, en kan warm water in de warmtebron worden opgeslagen. 's Winters gaat het omgekeerd. Omdat de warmte-uitwisseling met de aquifers relatief langzaam verloopt, heeft de gesloten kas ook nog twee bovengrondse watertanks die snel warmte of koude kunnen leveren.

Het Nederlandse bedrijf Innogrow is net als Ecofys een dochter van Econcert. Innogrow ontwikkelt nu het idee verder tot een nieuw type tuinbouwkas voor de teelt van gewassen: de *GeslotenKas*®. Een model van

de GeslotenKas bestaat uit vier belangrijke componenten: de plant (waarvoor een biologisch model wordt gebruikt); het klimaat in de kas (afhankelijk van de interne klimaatregulering maar ook van het weer); de energievoorziening (productie van warmte en koude en elektriciteit) en tenslotte de kosten en de opbrengsten (een economisch model). Een aantal van deze kassen is al verkocht en gebouwd.

Energieverbruik minimaliseren

De vier componenten van de kas moeten nu zo op elkaar zijn afgestemd dat het gewas tegen zo min mogelijk kosten zoveel mogelijk geld op de markt opbrengt. Innogrow wil graag weten hoe de GeslotenKas geoptimaliseerd kan worden en legde dit probleem voor aan de studiegroep.

Wiskundige Jaap Molenaar van de Wageningen Universiteit: "De vraag is gemakkelijk te stellen, maar we hebben lang gediscussieerd over wat je precies wilt en kunt optimaliseren. In het probleem zitten namelijk veel moeilijk grijpbare factoren. De prijs van gas en elektriciteit bijvoorbeeld. Die wordt bepaald door het energiebedrijf. Bij een andere prijs krijg je ongetwijfeld een andere optimale oplossing. Maar ook de prijs van de tomaten of de sla op de markt speelt een rol. Je kunt wel veel tomaten produceren, maar als op dat moment de prijs laag is, schiet het nog niet op

met je omzet. En wat doe je met de verwachte hoeveelheid zonneshijn?"

In overleg met Innogrow koos de studiegroep uiteindelijk voor het optimaliseren van het energieverbruik. Lou Ramaekers van Innogrow: "Het deelprobleem wordt dan om de gebruikte energie te minimaliseren, gegeven dat de tuinder weet welk klimaat hij in de kas moet aanleggen, en gegeven de energieprijzen. Wij hadden zelf wel eens wat gerekend met een genetisch algoritme, maar dat werd al snel erg bewerkelijk. Wij hoopten dat de studiegroep een slimmere oplossing zou bedenken."

Lineair programmeren

De studiegroep stortte zich vervolgens op het minimaliseren van de verbruikte energie voor een gemiddeld jaar. Innogrow heeft gegevens over hoeveel zonneshijn er gemiddeld is te verwachten op elk uur van de dag in dat gemiddelde jaar. De input die de wiskundigen gebruikten, bestaat uit de gemiddelde hoeveelheid zonneshijn per uur en de geschatte prijzen van gas en elektriciteit per uur.

Molenaar: "Het probleem blijkt vervelende randvoorwaarden te hebben. Zo moeten de aquifers na een jaar net zoveel warmte en koude hebben afgegeven als opgenomen. Anders zou het systeem de grond opwarmen of afkoelen en dat is wettelijk niet toegestaan. En zowel de boven- als ondergrondse vaten hebben een beperkte capaciteit. Datzelfde geldt voor de warmtepompen en de boilers. Nog lastiger wordt het met een speciaal soort boiler, die Combined Heat Power heet. Deze werkt op gas, en genereert behalve warmte ook elektriciteit. En die elektriciteit kun je in de kas weer gebruiken, maar je kunt hem ook aan het energiebedrijf leveren tegen een prijs die het energiebedrijf bepaalt. Dan moet je gaan uitrekenen wat financieel het meeste opbrengt: zelf gebruiken in de kas, of terugverkoppen aan het energiebedrijf. Dat zorgt voor lastige terugkoppelingen in het systeem. Alle randcondities samen bepalen wat wel en niet kan."

Het wiskundige model voor het energieverbruik van de GeslotenKas is nu een reeks van energievergelijkingen die bepaald wordt doordat op elk knooppunt in het netwerk evenveel energie in moet komen als er uit gaat. De beperkte capaciteiten van pompen en reservoirs vormen de randvoorwaarden.

Zo ontstaat een stelsel van vijftien energiebehoudsvergelijkingen, met vijftien randvoorwaarden. Molenaar: "De toestand van de GeslotenKas wordt op elk uur beschreven door een toestandsvector van ongeveer der-



Een inblik in een GeslotenKas® waarin tomatenplanten groeien in een goot op substraat. Daaronder lopen de luchtslangen die dienen om het kasklimaat te conditioneren. In de wanden van de slangen zitten gaten waardoor koude of warme lucht de kas wordt ingeblazen. Aan het begin van de slang (in de achtergrond op de foto) staan kasten met ventilatoren die de lucht in de slang blazen.

Foto: Innogrow ©

tig componenten: bijvoorbeeld hoe vol is een reservoir, wat zijn de warmte- of koudestromen in een verbindingspijp en wat is de energiebehoefte op dat uur? Vervolgens moet je op elk uur in een jaar die componenten zodanig kiezen dat de energiekosten voor het gehele jaar zo laag mogelijk zijn. Dit optimalisatieprobleem heeft dus zo'n $365 \times 24 \times 30 = 262.800$ onbekenden."

De grote stap voorwaarts is volgens Molenaar behaald doordat de vergelijkingen en de te optimaliseren functie lineair zijn gemaakt in de toestandsvector. Daardoor wordt het probleem zelfs voor een periode van een heel jaar behapbaar. De wiskundigen pakten standaard software op het terrein van het lineair programmeren uit de kast en brachten het model precies in de juiste vorm voor het softwarepakket.

"Voor het doorrekenen van een heel jaar, ontbrak ons de tijd", zegt Molenaar "maar met de methode die er nu ligt, kan Innogrow dat zelf doen. Daaruit volgt dan hoe ze de regeling voor een gemiddeld jaar moeten instellen en daaruit volgen waarschijnlijk ook adviezen over de capaciteiten van reservoirs en pompen. Een echt jaar wijkt uiteraard af van het gemiddelde jaar dat wij als invoer hebben gekozen, maar je kunt je voorstellen dat de tuinder in de praktijk een beetje om de optimalisatie voor een gemiddeld jaar heen regelt – een soort fijnafstemming dus."

Hoe niet-lineair is het probleem?

Wat Innogrow concreet aan de resultaten heeft, is volgens Lou Ramaekers van het bedrijf nog onduidelijk. "Ik vind het interessant wat er is uitgekomen, maar er zitten ook veel benaderingen in. Het is een allereerste begin. Om echt te weten wat deze aanpak oplevert, hebben we toch de berekeningen voor een heel jaar nodig, en daar gaan we nog verder naar kijken."

De studiegroep concentreerde zich nu op het energieverbruik omdat het probleem anders te ingewikkeld werd om in een week aan te pakken. "Door alleen naar de energie te kijken, kon het probleem gelineariseerd worden", vertelt Ramaekers. "In werkelijkheid werk je met waterstromen en temperaturen, en die twee vermenigvuldig je met elkaar om de energie-inhoud te berekenen.

Ze zijn onafhankelijk van elkaar. Een waterstroom varieert continu. En de temperatuur bepaalt niet alleen hoeveel energie het water met zich meedraagt, maar ook hoe efficiënt een apparaat in het systeem werkt. De watertemperatuur bepaalt bijvoorbeeld mede het rendement van een warmtepomp. Dat is een belangrijke ontwerpfactor en zo ontstaat een niet-lineair probleem. Het kan zijn dat de linearisatie voor het optimaliseren van het probleem toch een verantwoorde aanname is, maar dat moeten we nog verder onderzoeken."