

# OPTIMAAL PLANNEN VAN ONDERHOUDSTAKEN VOOR WINDMOLENPARKEN OP ZEE

Bij de dagelijkse planning van onderhoudstaken voor windmolenparken op zee komen veel routing- en planningsproblemen kijken. De grootste uitdaging is de beperkt aanwezige *engineers* zo efficiënt mogelijk in te zetten. We presenteren een nieuwe manier om dit probleem te modelleren en een exact algoritme om het op te lossen. Door de effectiviteit van onze nieuwe modelleringsmethode blijkt het exacte algoritme in staat om instanties met 45 onderhoudstaken over 14 tot 21 periodes optimaal te kunnen oplossen met redelijke rekentijden.

ALBERT H. SCHROTENBOER

In de transitie naar een duurzame samenleving waarin we de uitstoot van broeikasgassen weten te beperken, is de bouw van windmolenparken op zee een aantrekkelijk en groen alternatief voor de traditionele, niet duurzame energieproductie. De kosten voor het bouwen van windmolenparken op zee zijn de laatste jaren significant afgenomen. Naast de lage rentestand en goedkope staal-prijzen, is schaalvergroting een van de belangrijkste drijvende factoren voor deze kostendaling. Voor de OR-onderzoeker herbergt deze ontwikkeling een scala aan niet eerder bestudeerde optimaliseringsproblemen die gekenmerkt worden door eigenaardigheden die het toepassen van bestaande methodes en algoritmes behoorlijk complex maken.

In dit artikel\* gaan we in op een korte-termijn-planningsprobleem in de context van onderhoudslogistiek bij windmolenparken op zee. Wanneer de opbouwfase van een windmolenpark is afgerond begint de zogenoemde *operations & maintenance*-fase. In deze fase is – de naam zegt het al – het windmolenpark operationeel en is het van cruciaal belang dat het onderhoud zo efficiënt mo-

gelijk gepland kan worden om een zo hoog mogelijke energieopbrengst te garanderen.

De kern van het probleem bestaat uit het plannen van de inzet van relatief schaarse *engineers* voor het uitvoeren van taken die verschillende competenties vereisen. Deze *engineers* leggen dagelijks dezelfde route af: 1. van de haven naar de windturbines; 2. tussen verschillende windturbines zodat zij meerdere onderhoudstaken per dag kunnen voltooien; en 3. van de windturbines terug naar de haven. Gegeven dat een *engineer* een vaste dagelijkse compensatie ontvangt voor het werken op zee, en in beschouwing nemende de brandstofkosten die de boot maakt bij het uitvoeren van het transport van de *engineers*, is het duidelijk dat het realiseren van een optimale planning die de voorgenoemde kosten minimaliseert behoorlijk complex is.

Vanuit een OR-perspectief spreken we hier van een *pickup and delivery*-probleem met meerdere periodes. We modelleren elke onderhoudstaak als een set van twee nodes: één *delivery*-node die het arriveren van een boot bij de desbetreffende turbine modelleert (het



starten van een onderhoudstaak), en één *pickup*-node die het verlaten van de turbine na afronding van de onderhoudstaak modelleert. De *pickup*-node moet bezocht worden door dezelfde boot, in dezelfde periode, als de bijbehorende *delivery*-node. Terwijl de onderhoudstaak wordt uitgevoerd staat het de boot vrij om andere *engineers* te vervoeren. In het zogenoemde Multi-Period Service Planning and Routing Problem (MSPRP) zoeken we voor een gegeven verzameling van onderhoudstaken, *engineers*, en periodes, naar een optimale routing van boten zodat de som van transportkosten, *engineers*kosten, en onderhoudskosten geminimaliseerd wordt. We veronderstellen dat de onderhoudskosten exogeen zijn gegeven en afhankelijk zijn van de periode waarin het onderhoud gepland gaat worden. Onder deze aannamen kunnen we de relatieve urgentie van een individuele onderhoudstaak modelleren en kan er onderscheid worden gemaakt in preventieve onderhoudstaken (elke periode dezelfde kosten) en correctieve onderhoudstaken (oplopende kosten over de periodes).

## Probleem omschrijving en modellering

We modelleren het MSPRP op een gerichte, complete graaf. De nodes van de graaf zijn de *pickup* en *delivery* nodes, en een begin- en eind-depot. Gegeven zijn een set voertuigen en een set periodes. De standaard manier om het MSPRP op deze graaf te modelleren geeft een Mixed Integer Programming (MIP) formulatie met een polynomiaal aantal variabelen en constraints, en zou direct opgelost kunnen worden met standaard commerciële software zoals CPLEX of Gurobi. Echter, om problemen van praktische relevantie te kunnen oplossen modelleren we het MSPRP als een set-covering probleem. Hiervoor beschouwen we verzamelingen van routes voor elke periode en voor elk voertuig. In totaal geeft dat dus het aantal periodes maal het aantal voertuigen verzamelingen van routes. Elke route is geldig met betrekking tot de beperkingen op individueel route niveau. Bijvoorbeeld, *engineers* kunnen alleen van een *pickup* node worden opgehaald als ze eerst op de *delivery* node zijn afgeleverd. In de set-covering



formulering blijven er drie groepen *constraints* over:

1. er mag slechts één route per boot per periode gekozen worden;
2. elke onderhoudstaak moet minstens één keer bezocht worden;
3. voor elke periode is de hoeveelheid engineers die in de routes gebruikt worden gelimiteerd tot het aantal aanwezige engineers.

### Oplossingstechniek

De set-covering formulering van het MSPRP kunnen we oplossen met branch-and-bound waarbij we kolomgeneratiemethodes gebruiken om de LP relaxaties in elke branch-and-bound node op te lossen. Als we deze aanpak uitbreiden met valid inequalities dan wordt het resulterende algoritme een branch-and-price-and-cut algoritme genoemd. Het toepassen van de standaard branch-and-price-and-cut algoritmen is echter niet bijzonder succesvol. Dit wordt veroorzaakt door twee belangrijke karakteristieken van het MSPRP.

Ten eerste, voor het modelleren van de engineers beschouwen we een set van specialismen. Voorbeelden van die specialismen zijn het mogen werken met elektriciteit, hydrauliek, of beide. Elke onderhoudstaak vraagt een gegeven aantal engineers van elke specialisme. We nemen aan dat elke engineer over één specialisme beschikt. Stel je voor dat er twee boten zijn, één specialisme en zes beschikbare engineers. Dan kunnen we alleen routes selecteren die samen minder dan zes engineers gebruiken. Wanneer er meerdere specialismen zijn dan wordt dit vrij complex, hetgeen zorgt voor een behoorlijke afzwakking van de LP relaxatie en daarmee van de kracht van een kolom generatie methode.

Om dit tegen te gaan hebben we *valid inequalities* ontwikkeld gebaseerd op de welbekende *cover-inequalities* (zie bijvoorbeeld Gu et al. 1998,1999). We refereren naar deze *valid inequalities* als *resource-exceeding route (RER) inequalities*.

Normaliter zou men constraints gebruiken in de vorm  $\sum_{r \in R} x_r \hat{q}_r^i \leq Q_i$ , waarin  $x_r \in \{0,1\}$  aangeeft of een route is geselecteerd of niet, waarin  $\hat{q}_r^i$  het aantal benodigde engineers in route  $r$  van specialisme  $i$  aangeeft, en waarin  $Q_i$  het beschikbaar aantal engineers van specialisme  $i$

aangeeft. Echter, terugkerend op het voorbeeld van zes engineers met twee boten, staat deze vergelijking toe dat  $x_1 = 0,5$ ,  $x_2 = 1$ ,  $\hat{q}_1^i = 6$ , en  $\hat{q}_2^i = 3$  (want  $0,5 \cdot 6 + 1 \cdot 3 \leq 6$ ). Echter, het is vrij duidelijk dat deze twee routes (die samen 9 engineers gebruiken) niet samen in een oplossing kunnen worden gekozen ( $x_1 + x_2 \leq 1$ ). Dus, in plaats van constraints in de vorm van  $\sum_{r \in R} x_r \hat{q}_r^i \leq Q_i$ , gebruiken wij constraints in de vorm van  $\sum_{r \in S} x_r \leq \phi_s$  waar  $S \subset R$  en waar  $\phi_s$  aangeeft hoeveel routes van  $S$  gezamenlijk in een oplossing mogen worden gekozen. Deze constraints kunnen zelfs de traditionele constraints vervangen, echter geeft dat enkele problemen met het genereren van kolommen. Voor de details hoe we daarmee zijn omgegaan verwijzen we graag naar Schrotenboer et al. (2019).

Ten tweede, het MSPRP heeft weinig restricties voor het genereren van nieuwe kolommen (routes). Traditioneel worden nieuwe routes gegenereerd door labeling algoritmes waarin partiële routes iteratief verlengd worden met nieuwe onderhoudstaken, gebruikmakend van dominantie criteria die aangeven wanneer een partiele route nooit een verbetering kan geven ten opzichte van reeds gegenereerde partiële routes. Deze dominantie-criteria zijn bijzonder inefficiënt voor de MSPRP en daarom hebben we gekozen voor een depth-first search methode zoals recentelijk beschreven is in Lozano et al. (2015). Bovendien vraagt het enige voorzichtigheid om de RER inequalities correct mee te nemen als dual cost in deze depth-first search methode. We verwijzen wederom naar Schrotenboer et al. (2019) voor de details.

### Resultaten en conclusies

Het *branch-and-price-and-cut* algoritme is geprogrammeerd in C++ en maakt gebruik van SCIP 3.0. We hebben een set van benchmark instanties gecreëerd gebaseerd op informatie en kennis verkregen vanuit het onderzoeksproject 'Sustainable logistics for offshore wind farms' aan de Rijksuniversiteit Groningen.

Het blijkt dat de root node optimality gaps (het verschil tussen de waarde van de LP relaxatie en de optimale oplossing) met gemiddeld 63% wordt verkleind door het gebruik van de RER inequalities. Dit heeft als gevolg dat we instanties kunnen oplossen die bestaan uit 45 onderhoudstaken over een planningshorizon van 14–21

periodes Dit staat in schril contrast met standaard MIP methodes (met een polynomiaal aantal variabelen en constraints): Alleen oplossingen tot 10 onderhoudstaken zijn daarvoor gerapporteerd. Kijken we verder naar andere reeds bestaande algoritmes dan wordt de grens voor exacte oplossingsmethodes bereikt bij 24 onderhoudstaken verspreid over 3 windmolenparken. Cruciaal is dat hierbij wordt aangenomen dat routes niet in verschillende windmolenparken mogen plaatsvinden, wat een aanzienlijke verkleining van de oplossingsruimte met zich mee brengt. We concluderen dat het branch-and-price-and-cut algoritme goed presteert en een aanzienlijke verbetering is ten opzichte van de bestaande exacte methodes.

Inmiddels hebben we ook een studie voltooid die zich focust op meerdere windmolenparken die vanuit meerdere havens bevoorrad worden. Hierbij is de oplossingsmethode heuristisch (Schrotenboer et al. 2018). Voor toekomstig onderzoek is het interessant om de methodes van beide artikelen te integreren en om een eerste stap te zetten naar stochastische routerings- en planningsproblemen in onderhoudslogistiek voor windmolenparken op zee.

\* Dit artikel kan worden gezien als een samenvatting van recent gepubliceerd werk (Schrotenboer et al. 2019).

### REFERENTIES

- Gu, Z, Nemhauser, G.L., & Savelsbergh, M.W. (1998). Lifted cover inequalities for 0-1 integer programs: Computations. *INFORMS Journal on Computing*, 10(4), 427–437
- Gu, Z, Nemhauser, G.L., & Savelsbergh, M.W. (1999). Lifted cover inequalities for 0-1 integer programs: Complexity. *INFORMS Journal on Computing*, 11(1), 117–123
- Schrotenboer, A.H., Ursavas, E., & Vis, I.F.A. (2019). A branch-and-price-and-cut algorithm for resource constrained pickup and delivery problems. *Transportation Science (accepted)*
- Schrotenboer, A.H., Uit het Broek, M.A.J., & Jargalsaikhan, B., & Roodbergen, K.J. (2018) Coordinating technician allocation and maintenance routing at offshore wind farms. *Computers & Operations Research*, 98, 185–197

ALBERT SCHROTENBOER is PhD student in Operations Research aan de Rijksuniversiteit Groningen (begeleiders: prof. dr. Iris Vis en dr. Evrim Ursavas). Zijn onderzoek focust zich op het ontwikkelen van zowel exacte als (meta)heuristische methodes voor problemen in gedistribueerde logistiek. Eén van zijn toepassingsgebieden is onderhoudslogistiek voor windmolenparken op zee, onderdeel van het NWO project 'Sustainable service logistics for offshore wind farms'. E-mail: a.h.schrotenboer@rug.nl

### Nederlands Genootschap voor Besliskunde

Operations Research (OR) kan omschreven worden als de wetenschappelijke benadering van de probleemanalyse en besluitvorming bij het beheer en de besturing van complexe systemen. Hoewel hierbij in principe elke wetenschappelijke discipline gebruikt kan worden blijken in de praktijk vooral wiskunde, informatica en statistiek nuttig. In het Nederlands wordt het vakgebied ook wel Besliskunde genoemd, vandaar dat onze sectie nog steeds de afkorting NGB (Nederlands Genootschap voor Besliskunde) gebruikt. Internationaal heeft de Nederlandse OR een bijzonder goede reputatie. Dit komt zowel door het hoge niveau van het academische onderzoek en onderwijs als door het feit dat het vakgebied zich in de praktijk ver ontwikkeld heeft. Het laatste hebben we onder meer te danken aan een aantal zeer succesvolle bedrijven – waarvan ORTEC waarschijnlijk het meest bekend is – die zijn gespecialiseerd in het toepassen van OR. Het NGB streeft ernaar activiteiten te organiseren die interessant zijn voor zowel de besliskundigen in de academische wereld als die in de praktijk, en probeert daarmee deze twee groepen dichter bij elkaar te brengen. Het blad *STAtOR* sluit hier perfect bij aan omdat daarin op toegankelijke wijze zowel nieuwe toepassingen als nieuwe wetenschappelijke inzichten worden besproken. Bovendien laten juist de toepassingen vaak zien hoe belangrijk statistiek binnen de OR is en het NGB dus terecht deel uitmaakt van de VVSOR. Wij wensen *STAtOR* daarom nog veel jaargangen toe!

ALBERT WAGELMANS, voorzitter NGB  
e-mail: wagemans@ese.eur.nl