

A photograph of a dense forest with tall, thin coniferous trees. The foreground shows the base of the trees and some fallen branches. The background is filled with more trees, creating a sense of depth.

orbit

#04

Gennembrud for operationsanalyse i sigte?

ORbit
medlemsblad for
Dansk Selskab
for Operationsanalyse

Redaktion:

Ansv. Rene Munk Jørgensen (rmj)
Jesper Larsen (jla)

IMM, bygn. 305 - DTU
DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon: +45 4525 3385
Fax: +45 4588 2673
E-mail: orbit@dorsnet.dk

Næste deadline:
15. september 2003

Tryk:
Paritas Grafik A/S
Oplag: 300
ISSN 1601-8893

Teknisk assistance:
Britt Morelli Hansen

Annoncepriser
Pr. 1/4 side: 500,- kr.
Pr. 1/2 side: 1000,- kr.
Pr. 1/1 side: 2000,- kr.
Firma- og institut-medlemmer af
DORS får 50% rabat.

En af DORS' vigtigste opgaver er at fremme kendskabet til operationsanalysen. For en lille forening og et relativt lille forskningsområde er dette selvsagt ikke let, men via foredrag, medlemsbladet ORbit og vores hjemmeside på nettet forsøger vi til stadighed at komme ud med budskabet om operationsanalyseens potentielle.

Igennem DORS' historie har man genlagte gange troet, at nu var operationsanalyseens gennembrud lige rundt om hjørnet. Dansk OR's mest fremtrædende folk har kæmpet indædt om bestyrelsesposterne i DORS (!) for der gennem at stå stærkt når OR's endelige gennembrud ville vise sig.

Skuffelsen har derfor været stor, for gennembrudet er aldrig rigtig kommet – slet ikke i Danmark. Selskabet har endog en overgang været ved at nedlægge sig selv. Sådan gik det heldigvis ikke.

Nu synes det som om, der efter tegner sig en mulighed for et gennembrud for operationsanalyse. Igennem de senere år har flere forhold etter givet næring til optimisme påny, og en række faktorer giver grund til optimismen:

- Computerkraft fås nu i rigelige mængder til næsten ingen penge. Således er avanceret databehandling ikke kun forbeholdt store koncerne og forskningsinstitutioner.

- Nye landvindinger inden for såvel eksakte metoder som heuristikker har givet operationsanalytikeren nye værktøjer og forbedret gamle.

- Den omfattende fokus på forskellige IT-systemer som f.eks. ERP-systemer og digitaliserede vejkort sikrer ofte tilstedeværelsen af de data man ønsker at arbejde med i digitaliseret form.

Det er således ingen tilfældighed at Carmen Systems i Sverige er blevet kåret til årets IT-virksomhed i 2003. Hårdt og målrettet arbejde med operationsanalyse og optimering inden for luftfart og jernbane har resulteret i avancerede IT-systemer, der sikrer kunderne en konstant fokus på optimal udnyttelse af egne ressourcer.

Til lykke til Carmen og lad os håbe på at det ikke kun er i Sverige, man opdager mulighederne i operationsanalyse.

Aktuelt om DORS juli 2003

Medlemsskab

Kontingentsatser indtil 31/12 2004

Personlige medlemmer

(incl. ph.d.-studerende): 250 kr./år

Studerende: 50 kr./år

Firmamedlemmer: 3000 kr./år

Institutmedlemmer: 1500 kr./år

Sekretariat

DORS

IMM, Bygning 321

Danmarks Tekniske Universitet,

2800 Kgs. Lyngby

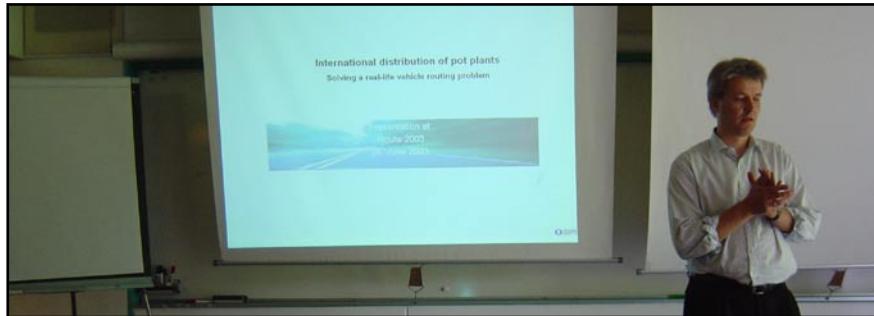
e-mail: dors@dorsnet.dk

Internet

www.dorsnet.dk

Indbetales på Giro 9123865 (reg.nr. 1199)

Formanden har ordet ...



DORS har for nylig afholdt sin ordinære generalforsamling, som er refereret kort sidst i denne udgave af ORbit. Det var desværre lidt småt med fremmødet, men til gengæld kunne de tilstede værende glæde sig over at se tilbage på et fantastisk DORS år i 2002.

Året bød således på de to første numre af ORbit, festligholdelse af DORS' 40 års jubilæum samt en lang række spændende arrangementer - og glædeligvis har et konkret svar på de mange aktiviteter været en markant medlemsfremgang på studenter- og firmasiden.

I år har DORS været på besøg hos COOP Danmark Logistik og hos Transvision – begge med stort fagligt udbytte

– og der ligger mange nye arrangementer i støbeskeen til efteråret og vinteren.

Inden da vil du kunne finde DORS på ISMP konferencen på DTU (www.ismp2003.dk) fra d. 18. - 22. august, hvor DORS deltager med sin egen stand. DORS vil tillige udgive et særnummer af ORbit på engelsk i anledning af den store konference.

Men lige nu og her er der mulighed for at fordybe sig i en ny samling velskrevne og meget interessante artikler, som spænder vidt - såvel emnemæssigt som geografisk.

Søren K. Nielsen
Formand for DORS

Indhold

| | |
|---|----|
| Leder | 2 |
| Formanden har ordet ... | 3 |
| Med OR helt ude i skoven | 4 |
| Optimised Vehicle Routing at a Seaport Container Terminal | 8 |
| Anvendelse af kolonnegenerring ved udskæringsproblemer | 16 |
| Masterkursus med David Ryan | 26 |
| DORS' generalforsamling 2003 | 27 |
| Route2003: OR i logistikkens tjeneste | 28 |

Medlem af flg. internationale organisationer

- EURO: The Association of European Operational Research Societies
- IFORS: International Federation of Operations Research Societies

Institutmedlemmer

- Afdeling for Operationsanalyse, KU
- Datalogisk Institut, KU
- Center for Trafik og Transport, DTU
- Informatik og Matematisk Modellering, DTU
- Afdelingen for Operationsanalyse, AU
- Institut for Organisations og Ledelse, SDU
- Institut for Driftsøkonomi og Logistik, Handelshøjskolen i Århus

Firmamedlemmer

- Carl Bro a/s, IT og Telekommunikation
- Carmen Consulting Denmark
- COWI
- eGruppen
- Elkraft a.m.b.a.
- Forsvarets Forskningstjeneste
- MOSEK
- Transvision A/S

Af Carsten Nico Hjortsø, Institut for Økonomi, Skov og Landskab, Landbohøjskolen

Med OR helt ud i Skoven

Inden for **naturressourceforvaltning** er der en veludviklet tradition for anvendelse af **OR** metoder. I store skovbrugsnationer som Sverige, Finland, USA og New Zealand har bl.a. matematisk programmering vundet udbredt anvendelse i forbindelse med produktions- og transportoptimering.

Baggrund

I dansk skovbrugsforskning har OR fået en stadig mere fremtrædende rolle siden starten af 90'erne. Gennem en række PhD- og forskningsprojekter er der blevet sat fokus på mulighederne for anvendelse af OR inden for skov- og naturressourceforvaltning. På Sektion for Skovbrug ved Landbohøjskolen (KVL) har interessen for OR primært omfattet lineær programmering (fx Tarp, 1994), multi-criteria decision-making (MCDM) (fx Tarp og Helles, 1995; Hjortsø, 1997), og lokalsøgningsheuristikker som tabu-søgning, simuleret udglødning og genetiske algoritmer (fx Strange et al., 2000, Strange et al., 2001a,b). Hovedvægten har således været på anvendelse af de klassiske såkaldte »hårde« OR metoder.

I det følgende præsenteres et PhD-projekt der tager sit udgangspunkt i denne udvikling, men som noget nyt introducerer afhandlingen desuden en ny kategori af OR metoder, de såkaldte »bløde« OR metodikker i forbindelse med skov- og naturressourceforvaltning.

Hård OR

PhD-projektets udgangspunkt var at undersøge mulighederne for at bruge MCDM metoder til at løse konflikter i



den offentlige naturressouceforvaltning. I to case studier illustreres forskellige muligheder for anvendelse af LP-baserede MCDM metoder. I det ene studie udvikles en række scenarier for flersidig skovbrug på et statsskovdistrikt i Litauen (Hjortsø og Stræde, 2001). Flersidigheden indikeres af at forskellige målområder fx økonomiske, rekreative, naturmæssige og æstetiske, inddrages parallelt. Det andet studie anlægger ligeledes en scenarietilgang. I dette studie arbejdes med et helhedsorienteret perspektiv på udviklingsmulighederne for et geografisk område bestående af tre landsbyer i en bufferzone omkring en nationalpark i Nepal (Hjortsø og Stræde, 2003). Denne case er præget af de klassiske konflikter, der ofte optræder mellem naturbeskyttelse på den ene side og økonomisk og social udvikling på den anden.

Med PhD-projektets specifikke fokus på konflikter mellem forskellige brugergrupper og hermed den sociale dimension, opstod der hurtigt en erkendelse af, at de 'hårde' kvantitative metoder har et relativt begrænset anvendelsesområde i denne kontekst. I håndtering af konfliktfyldte planlægningssituationer adresserer kvantitative metoder baseret på optimering og simulering kun en del af problemet. Den største udfordring ligger i at de involverede aktører ofte har vidt forskellige perspektiver på, hvad det egentlige problem er, hvilke midler der bør tages i anvendelse for at løse det, samt hvordan de forskellige aktørers præferencer skal vægtes. Sådanne spørgsmål skal i principippet være relativt afklarede for at kunne anvende MCDM tilgangen effektivt. Dertil kommer at kvantitative data ofte er en mangelvare i naturressourcesammenhænge og at det ofte er

forbundet med store omkostninger at fremskaffe pålidelige og relevante data - hvis det overhovedet er muligt.

Blød OR

Af ovennævnte årsager ændredes projektets fokus derfor gradvist mod de 'bløde' OR metoder. Disse metoders fokus på de sociale processer i forbindelse med strategiudvikling og kompleks problemløsning gør dem særdeles relevante i den type planlægningssituationer projektet behandlede. 'Bløde' metoder forud-sætter aktør-deltagelse og orientering mod handling forankret i konsensus. Effektiv problemafdækning og problemstrukturering er et fundamentalt element i disse situationer. Udfordringen består i at finde metoder til at håndtere de mange og ofte meget forskellige virkelighedsopfattelser og værdisæt, der er repræsenteret blandt de involverede interesser fx i forbindelse med borgerinddragelse i den offentlige forvaltning. De bløde metoder bygger grundlæggende på en konstruktivistisk virkelighedsopfattelse og anerkender nødvendigheden af at kunne håndtere subjektive perspektiver på en konstruktivt måde, der leder hen mod konsensus blandt de involverede. Hvor de 'hårde' metoder anvender matematik og formel logik, bygger de 'bløde' OR metoder primært på et fortolkningsvidenskabeligt grundlag. Se i øvrigt Victor Vidal's artikel *Hvad er »Bløde« Operationsanalyse-metodikker?* i ORbit nr. 2 oktober 2002 for en uddybende omtale af »blød« OR.

PhD-projektet omfatter to case studier med anvendelse af »blød« OR. I det ene studie anvendes Strategic Option Development and Analysis (SODA) i forbindelse med taktisk skovplanlægning på Jægersborg Statsskovdistrikt (Hjortsø, 2003). I det andet studie anvendes Soft Systems Methodology i forbindelse

med udviklingen af et GIS¹-baseret skovplanlægningsværktøj til langtidsplanlægning af et Vietnamesisk mangrove-skovdistrikt i Mekong-deltaet (Hjortsø og Christensen, 2003).

Kritisk OR

De bløde OR-metoder er blevet kritiseret for ikke at forholde sig kritisk til asymmetriske magtforhold og herigenom at gå »magthaverenes« ærende. Når man arbejder i en udviklingskontekst aktualiseres sådanne overvejelser. Mange af de participatoriske metoder der er »in« i udviklingsarbejdet bygger på en antagelse om lokal konsensus omkring mål og midler til forbedring af livsvilkårene for de involverede. Når aktørdeltagelse/-inddragelse organiseres uden øje for lokale konflikter og magtforhold fastholdes eksisterende magtstrukturen. Herved bidrager (OR-)konsulenten eller forskeren måske til at fastholde sociale eller fordelingsmæssige uligheder, som et udviklingsprojekt netop skulle rette op på. Denne kritik har naturligvis universel gyldighed, hvor beslutningsprocesser baseres på inddragelse og konsensus-beslutninger, såvel i Nord som i Syd.

Denne kritik af den bløde OR praksis er blevet fremført fra den såkaldte kritiske OR. I den kritiske OR fokuseres ikke så meget på valget af metoder. Derimod argumenteres for en »multimethodology«-tilgang. Det vil sige ideen om, at en given situation og kontekst må være udslagsgivende for hvilke metoder og teknikker der bringes i anvendelse. Således designes en intervention baseret på »hård« og/eller »blød« OR afhængig af formålet. Centralt for kritisk OR er idealet om at frigøre de involverede og berørte interesser for undertrykkende kræfter og skabe mulighed for personlig og samfunds-mæssig udvikling. Det sidste studie i afhandlingen anlægger et sådant kritisk

perspektiv. I dette studie udvikles en metode til aktøranalyse, med det formål at gennemføre en grundig afdækning af konflikter og magtrelationers indflydelse på en planlægningssituation.

I det følgende præsenteres et af de fem case studier mere detaljeret. Som det fremgår af ovenstående, spænder afhandlingenens fem studier over en række forskelligartede naturressource-relaterede problemstillinger. Geografisk bevæger vi os fra Danmark over Litauen og Nepal til Vietnam. Og på det teoretiske plan spænder studierne over spektrumet fra 'hård' over 'blød' til kritisk OR. Efter gennemgangen af Dyrehave case studiet afsluttes artiklen med en diskussion af nogle potentielt meget lovende udviklingsområder for OR.

Taktisk skovplanlægning i Statsskovbruget

Kan de bløde OR metoder bidrage til at effektivisere statsskovbrugets borgerinddragelsesproces i forbindelse med den periodiske skovplanlægning? Ja det kan de godt. Det blev i hvert fald konklusionen på et samarbejde med Jægersborg Dyrehaves brugerråd omkring brugerrådets inddragelse i statsskovbrugets planlægning i perioden 1999-2002.

Brugerrådet består af repræsentanter fra en række interesseorganisationer, lokale kommuner, amtet, og relevante specialister. Man mødes 1-2 gange om året og interaktionen med skovdistriket har normalt mest karakter af gensidig orientering. I forbindelse med udarbejdelsen af skovdistrikts plan for de næste 15 år bliver brugerrådets medlemmer spurgt, om de har ønsker eller ideer, de ønsker medtaget i planlægningen.

Case studiet tog udgangspunkt i denne

situation og sigtede mod at udvikle og afprøve en ny metode til afdækning af interesserernes interesser, forestiller og ønsker forud for den egentlige planlægningsproces. Problemstruktureringsmetoden Strategic Option Development and Analysis² (SODA) blev anvendt i en modifieret udgave. SODA bygger på ideer fra kognitiv psykologi og stiler mod etablering af en fælles erkendelse af en problemstilling vha såkaldte kognitive kort. Kognitive kort er grafiske repræsentationer af den enkeltes opfattelse eller oplevelse af samspillet mellem de forskellige elementer i fx en planlægningssituation. I første fase afdækkes de forskellige deltageres forståelse af årsags-effekt relationer gennem individuelle interviews eller gruppe-interviews. På baggrund af de enkelte interviews udarbejdes kognitive kort for hver enkelt deltagelse og disse kort verificeres med informanten. Efterfølgende samler facilitatoren de individuelle kort i et samlet kort (et såkaldt facilitative device) for gruppen. Dette samlede kort bruges nu som udgangspunkt for gruppens yderligere uddybning af problemstillingen og etablering af en fælles forståelse af situationen. Denne fase afløses af en facilitator-styret forhandlingsproces frem mod en konsensus-løsning.

I Jægersborg Dyrehave casen blev der udarbejdet et »facilitative device« bestående af 17 tematiske del-kort byggende på interviews med fem brugerrådsmedlemmer. Disse kort blev samlet i et idé- og debatkatalog tænkt som grundlag for den videre planlægningsproces. Kataloget blev efterfølgende evalueret af brugerrådets medlemmer og Skov- og Naturstyrelsens medarbejdere med ansvar for processen.

Konklusionen på case studiet er at brugen af SODA ville kunne forbedre planlægningsgrundlaget og –proces-

sen. Man ville kunne opnå langt større indsigt i deltagernes forventninger, ønsker og ideer. Processen med at udvikle de kognitive kort, gav de enkelte brugerrådsmedlemmer mulighed for arbejde mere målrettet med processen og efterlod en følelse af, at man også reel var blevet taget med på råd. For de planlægningsansvarlige udgjorde tema-kortene et godt udgangspunkt for en fyldestgørende redegørelse for, hvordan forskellige aspekter var blevet overvejet i løbet af processen. Brugen af SODA er naturligvis væsentligt mere tidskrævende end den traditionelle fremgangsmåde. Endeligt blev det fremhævet, at hvis det er en medarbejder fra Skov- og Naturstyrelsen, der fungerer som facilitator, kan SODA give Styrelsen en enestående chance for at få en detaljeret indsigt i, hvordan dets medspillere i naturforvaltningen tænker om den.

Konklusion

Den overordnede konklusion på mit PhD-projekt, er at OR har et stort potentiale for at bidrage til løsning eller forbedring af mange forskellige typer af konfliktfyldte situationer i naturforvaltningen. Men vi har både brug for de »hårde« kvantitative teknikker og de »bløde« kvalitative tilgange. Et kritisk udgangspunkt med fokus på problemstilling og kontekst og situationsbestemt procesdesign virker som et godt grundlag for praktisk relevans i en kompleks virkelighed.

Udover fortsat at forfine de enkelte discipliner står den del af OR-miljøet der retter sig mod praksis overfor en enestående udfordring: at udvikle trans- og multidisciplinære forskningsmiljøer der kan forene den »hårde«, den »bløde« og den kritiske OR samt virkeligøre de synergieffekter, der findes på brudfladerne mellem disse

traditioner. En sådan forskningsagenda vil placere OR centralt i mange af de fundamantale problemstillinger, som det moderne samfund kæmper med. For den interesserede læser henvises i øvrigt til Vidal (1999) hvor der gives en samlet præsentation af de tre hovedretninger inden for OR.

Naturressourceforvaltning er et interessant forsknings-område fordi det integrerer den objektive og kvantificerbare (hårde) fysiske virkelighed og den (bløde) subjektive individuelle og sociale sfære. Hvis vi som OR praktikere skal bidrage med langsigtede økonomisk, økologisk og socialt bæredygtige løsninger virker en integration mellem det »hårde« og det »bløde« som et tiltalende udgangspunkt.

Litteratur

- Hjortsø, C.N., 1997. Multiple criteria decision making in forest management planning, MSc Thesis, KVL
- Hjortsø, C.N., 2002. Systems-based conflict resolution and complex problem solving in natural resource management, PhD thesis, KVL.
- Hjortsø, C.N., 2003. Enhancing public participation in natural resource management using soft OR – an application of SODA in tactical forest planning, EJOR, in press.
- Hjortsø, C.N. & S. Stræde, 2001. Strategic multiple-use planning in Lithuania - applying multi-criteria decision-making and scenario analysis for decision support in an economy in transition, Journal of Forest Policy and Economics 3 (2001): 175-188.
- Hjortsø, C.N. & S. Stræde, 2003. Toward landscape management in protected areas and buffer zones: a land-use model for solving natural resource deficiencies and park-

people conflicts, forthcoming in Journal of Forest Economics.

Hjortsø, C.N., S.M. Christensen & F. Helles, 2003. Using soft systems methodology to develop a mangrove forest management and planning decision support system in a buffer zone – the case of Dam Doi Forest Enterprise, Vietnam, submitted to Agricultural Systems.

Hjortsø, C.N., S.M. Christensen & P. Tarp, 2003. A rapid stakeholder and conflict assessment for natural resource management using cognitive mapping: the case of Dam Doi Forest Enterprise, Vietnam, Submitted to Agriculture and Human Values.

Rosenhead, J. & J. Mingers (Eds.), 2001. Rational analysis for a problematic world - problem structuring methods for complexity, uncertainty and conflict, Wiley, Chichester.

Strange, N., 2000. Studies in methods for decision making in multiple-use forestry, PhD thesis, KVL.

Strange, N., H. Meilby & B.J. Thorsen, 2001a. Optimisation of land use in afforestation areas using

evolutionary self-organisation. Forthcoming in Forest Science.

Strange, N., H. Meilby & P. Bogetoft 2001b. Land use optimisation using self-organisation. Natural Resource Modeling 14: 541-574.

Sørensen, L. & R.V. Vidal, 1999. Strategi og planlægning som læreproces: Seks bløde fremgangsmåder. Handelshøjskolens Forlag, København.

Tarp, P. & F. Helles, 1995. Multi-criteria decision-making in forest management planning – an overview, Journal of Forest Economics 1(3): 273-306.

Tarp, P., 1994. Application of OR methods in Danish forest management planning, PhD thesis, KVL.

Vidal, R.V., 1999. Operational research approaches for planning, lecture notes 1999, IMM, DTU.

Fodnoter

¹ Geografisk Informations System

² En introduktion til SODA findes fx i Rosenhead & Mingers (2001) og Sørensen & Vidal (1999).



Af Carsten Nico Hjortsø (e-mail: Carsten.N.P.Hjortsoe@flec.kvl.dk), Institut for Økonomi, Skov og Landskab, Landbohøjskolen.

Nico Hjortsø er adjunkt i operationsanalyse, kompleks problemløsning og konflikthåndtering ved Institut for Økonomi, Skov og Landbrug på Landbohøjskolen.

Nico arbejder i sin forskning og undervisning med udvikling af OR-baserede metodikker i participatorisk planlægning og borgerinddragelse.



www.carmenconsulting.com



By Dirk Steenken, Hamburger Hafen- und Lagerhaus AG (HHLA).

Optimised Vehicle Routing at a Seaport Container Terminal

Straddle carriers are widespread at container terminals. They stand for flexible, rapid and dynamic operation. Productivity of straddle carrier operation still can be enhanced by using mathematical methods of optimisation. Calculating optimal sequences of transport orders allows to reduce empty ways and transport times.

Introduction

The paper reports on an optimisation system for straddle carriers implemented at HHLA's Burchardkai Container Terminal in Hamburg. Methods of optimisation, architecture of the system and the results of optimisation are described in detail.

Components of the Logistic System

The Burchardkai Terminal had an annual throughput of 2.3 mio TEU in 2001 which is about 50% of the total turnover of the port of Hamburg. More than 900 deep-sea and 3.200 feeder vessel calls are operated per year. The truck operation area has to cope with about 3.200 trucks a day while at the railhead 1.400 TEU are operated in average. The daily amount of full containers in the yard is ranging from 14.000 to 20.000 TEU. All operations together result in up to 15.000 container movements a day which are performed by a fleet of 100 straddle carriers.

The logistic concept developed for the Burchardkai focuses on three topics:

- an optimised yard stacking system to choose automatically yard stack positions appropriate to the loading of ships, trucks and rails. No planning occurs, yard slots are chosen in real-time. The aim is to minimize yard re-shufflers during delivery. Such a concept is based on the precise yard position of containers and an enhanced stack logistic.

- a satellite positioning system (DGPS) to automatically localize the container position in the yard. The position of every container in the yard has to be absolutely correct because seeking containers in a stack of 20.000 units is nearly impossible and can cause delays of ship departures. The positioning system is the technical base for the real-time stacking system.¹

- a straddle carrier optimisation system to reduce unnecessary empty ways during transportation. This problem was solved by implementing methods of linear programming to calculate optimal sequences of container transport orders. A dynamic balancing system automatically shifts straddle carriers to where they are needed.

All factors together enhanced the productivity of yard and crane operation. The straddle carrier optimisation system will be described in detail.

The vehicle routing system

The straddle carrier optimisation and control system consists of two main components:

- the hinterland routing system and
- the quayside optimisation system.

The hinterland routing system optimises all jobs occurring for truck, rail and yard internal operations. The different working areas are integrated by a master routine, which dynamically balances the number of straddle carriers according to the current job volume. The benefits of this system are: savings of 50.000 km/year and a gain in productivity of about 50%.

The quayside operation demands for a different kind of straddle carrier optimisation. The optimisation system applied focuses on just-in-time delivery of containers to the quay cranes. Especially it synchronizes crane operation and horizontal transport. Increase of productivity is in the range of 10%.

The optimisation system for truck operation

Because of the permanently changing volume of trucks and containers at the truck operation area the optimisation system has to be very flexible and fast. Such a problem situation asks for real-time optimisation. The automatic optimisation system has to react on the following constraints:

- peak values of up to 300 containers hour
- no information about arrival times of trucks
- truck waiting time to be as short as possible
- last minute containers to be handled with priority

The problem to be solved can be described as follows: At the truck interchange area export containers are picked up and transported to the yard while import containers have to be transported from the yard to the interchange. The idea of optimisation is to combine all export and import moves in a way that the total sum of empty distances is minimised. Such an assignment problem can be solved exactly with mathematical methods of operations research.

Several algorithms were applied to the problem and tested with real data. A very fast algorithm was implemented reflecting on all constraints described above. The algorithm calculates optimal pairs of export - import moves. Transportation jobs are automatically allocated to straddle carriers becoming available - no dispatcher is necessary. Data are transmitted by radio data communication (rdt) onto the screen installed at the drivers cabin. Any time new trucks arrive at the holding area re-optimisation is performed for all jobs not yet allocated to straddle carriers.

After implementation of the system the rate of empty moves decreased from 41% to 28%, while the rate of moves connecting export and import transports increased from 4% to 14%. This resulted in a saving of 24.000 km/ year.²

The optimisation system at the railhead

The routing problem at the railhead resembles somewhat to the optimisation problem at the truck operation area. But in concrete the operation is quite different and a specific solution had to be found. Rail operation has a lot of variants which have to be covered by an automatic optimisation system. Movements of straddle carriers and cranes (RMGs) have to be synchronized. Operational constraints have to be reflected in the routing system:

- loading and discharging of about 1.400 containers for 14 to 16 trains a day
- fixed schedule for train arrivals and

- departures
- schedule and loading plan have to be kept by the terminal operator
- concrete mode of loading and discharging containers by RMGs depend on the buffer situation at the railhead.

After arrival of a train the computer system automatically selects optimal yard positions for export containers to be unloaded. Then the system calculates pairs of export and import containers (to be loaded) which are optimal in respect of minimal yard distances. This is done in a way similar to the truck operation. In a second step different pairs of export and import containers are linked together to build transport sequences. A manyfold number of variants exists to create such links. The concrete mode is pretended by the operation mode of the transtainer at the railhead. It mainly depends on the buffer situation along the railhead. To give two examples:

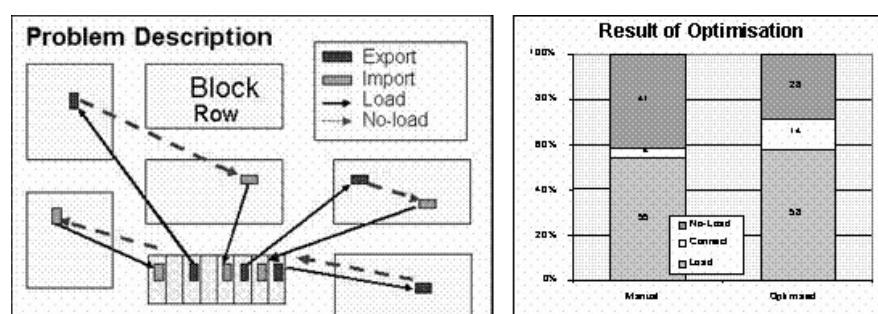


Fig. 1: Optimisation problem at truck operation area and results of optimisation.

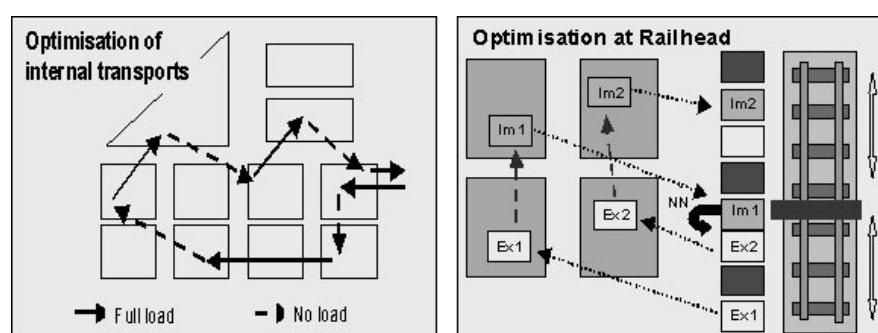


Fig. 2: Optimisation problem for rail operation and internal yard moves.

- if there is a sequence of empty slots in the buffer then the transtainer (RMG) can proceed sequentially. The sequences of export-import pairs are then defined by the wagon position of the import containers to be loaded
- if many buffer slots are occupied and empty slots are randomly spread the transtainer has to move to-and-fro. Import-export pairs then can be linked to transport sequences by using a heuristic minimizing empty ways.

Parameters for all possible kinds of operation at the railhead can be set in the routing system to be actualised by the control staff. It allows for a smooth automated operation. Measurements showed that the routing system applied to the rail operation results in an annual saving of about 12.000 km.

Optimisation of internal yard moves

The Burchardkai Container Terminal is a multi-user, multi-purpose terminal with two sheds and an empty depot in its area. Transportation between these facilities are performed by straddle carriers belonging to a special working area. It encloses all transportation like delivery of import containers to sheds for stripping, delivery of stripped containers to empty depot, delivery of empty containers to be stuffed at sheds, transport of stuffed containers to export stock and reorganisation of yard stock.

Special conditions occur which have to be reflected by the optimisation system:

- permanent creation of new jobs during a shift
- jobs have to be performed within pre-defined time windows
- low priority compared to other operation areas (ship, truck, rail)
- up to 200 jobs per shift.

Different to the truck operation area sequences of jobs have to be calculated. This problem is much harder to solve, no method exists to find the optimal solution. The problem gets even harder when time-windows have to be taken into account and sequences have to be calculated for a multiple number of vehicles. But this is the case for the straddle carrier routing problem mentioned. The problem was modelled as a Multiple Travelling Salesman Problem with Time Windows and several heuristics were tested in respect of distance savings and processing time. The Best Insertion heuristic was selected because of good results and short processing time which allowed real time optimisation.³

Optimisation in the yard area led to a reduction of empty distances of about 30% which sums up to a yearly saving of 14.000 km. As jobs are permanently created during a shift the planning horizon for optimisation was restricted to 10 min. Transport jobs are automatically assigned to straddle carriers by rdt one after the other until new jobs are entered and re-optimisation is done.

Integrated Hinterland Routing

After having implemented these systems one by one (done to earn economic savings immediately) the routing systems for the truck and railway operation and for the internal yard moves were integrated into one system. The integrated system automatically and dynamically balances the number of straddle carriers according to the current job volume. 'Dynamic balancing' is performed by a master routine which permanently controls the workflow in each area of operation. It automatically makes decisions on shifting straddle carriers to where they are needed.

The master routine has a complex structure:

- in a first step optimisation is performed independently for each operation area (as described)
- in the second step the total time for performing all jobs per operation area is calculated
- the number of straddle carriers needed is deduced from time calculation taking specific time frames into account (train schedule, max. waiting time for trucks, straddle carrier speed, etc.)
- after having calculated the number of straddle carriers an appropriate number of them are shifted to where they are needed.

The decision of which straddle carriers have to be shifted to another operation area is done according to rules and priorities which reflect on:

- straddle carriers currently without jobs
- straddle carriers near to next jobs
- straddle carriers with longest idle times
- straddle carriers seldom balanced.

The dynamic balancing system especially reacts on peak situations suddenly occurring – thus minimising the possibility of congestions.

The optimised straddle carrier routing and dynamic balancing system was integrated into a software system using modern window technology. This system is the main steering and

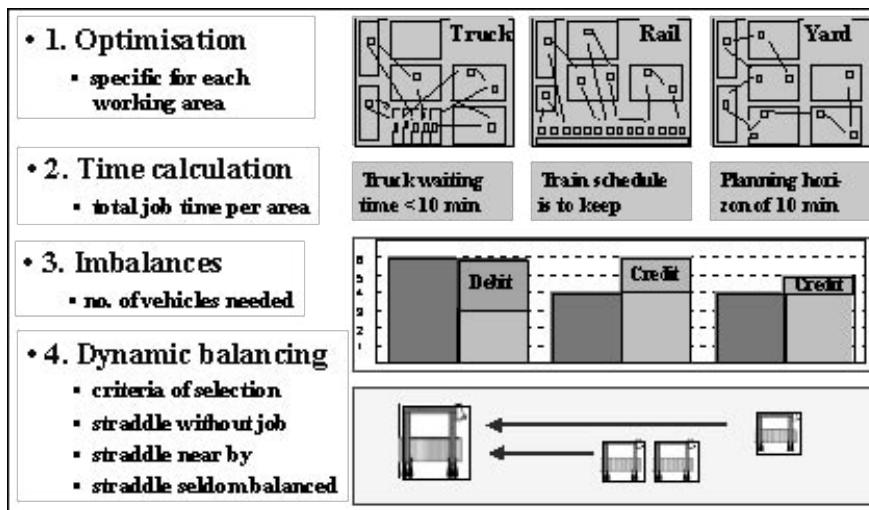


Fig. 3: Structure of the straddle carrier optimisation and balancing system

control system for the whole hinterland operation. It allows for optimised and automatic operation for trucks, rails and internal moves. Parameters can be changed very quickly by the staff enabling the system to cover different modes of operation.

The results of the optimised routing system as a whole were found to be:

- a total saving of 50.000 km per year
- a gain of productivity of about 50%
- a reduction of the control staff from 10 to 2 employees per shift

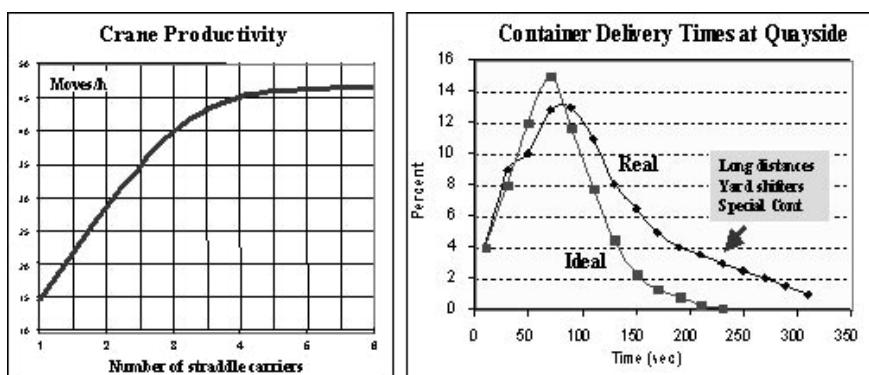


Fig. 4: Dependence of crane productivity and number of straddle carriers - time distribution of container delivery to quay crane

The high gain in productivity is not only due to optimisation (reduction of empty distances) but also on dynamic balancing which enhances straddle carrier utilisation.

Quayside optimisation

Optimising the transport sequences at the quayside is more complex than the optimisation for truck, rail or yard operations. Ship operation itself is a complex process. Optimisation at the quayside not only means to reduce empty distances of transports but also has to synchronise the transports with the loading and unloading activity of the gantry cranes. A general aim is to enhance crane productivity. Crane productivity does not mainly depend on the technical data of the cranes but on the frequency of delivering containers to the crane. A higher frequency could be gained if the number or the speed

of the transport means is enhanced. Both solutions contain conflicts. Employing additional straddle carriers is cost extensive and will not necessarily result in a respective gain of productivity. Simulations performed by HHLA pointed out that quay crane productivity gets into saturation when the number of straddle carriers is enhanced. This is because the possibility of congestions at the cranes and in the yard increases more than proportionally with the number of vehicles. Therefore time reduction can not be the mere goal of quayside straddle carrier optimisation. Developing an optimisation system also has to cope on the minimisation of congestions.

The ship-to-shore transportation process was analysed in detail before making a concrete decision on the objective of optimisation. Time distributions of container deliveries from the yard to the cranes were studied for several ships. These distributions are characterised by a maximum of about 90 sec which stands for suitable services. But most of the distributions have 'tails' resulting from longer service times. They are caused from long yard-crane distances, yard shifters, containers needing special equipment, etc.

The aim of optimisation is to make the delivery distribution as narrow as possible to get shorter average delivery times. It was solved by developing a just-in-time concept

which minimises the waiting time of the cranes. The idea is to deliver containers to the cranes in a fixed frequency guaranteeing minimum crane waiting times and avoiding vehicle congestions. The objective of optimisation then is to minimise the deviations from the fixed frequency. This solution was applied to the different modes of operation occurring at the quay side – the single and the double cycle mode.

Single cycle mode

The common mode of vehicle operation at the quayside is to allocate a fixed number of transport vehicles to one crane. These vehicles serve only one crane and either transport discharged containers from the quay to the yard or export containers from the yard to the crane. Combinations of transports do not occur.

Optimisation for discharged containers is restricted to the selection of optimal yard positions. Empty transport distances can not be reduced in this mode. For export loading however there is a potential for optimisation. In general the transport sequence does not correspond to the loading sequence of the ship. The loading sequence is determined by the stowage plan, the crane split and the crane's loading strategy. The transport sequence however has

to reflect on different distances and yard shifters. Export containers for the same ship are stacked in different yard areas with different distances to the cranes' quay positions. Yard shifters occur during the transport process when containers have to be removed before the container wanted can be picked up. For special containers like overheight containers special equipment has been fetched before these containers can be transported by the vehicles. All these factors result in additional transportation time which alters the transport sequence compared to the loading sequence. The transport sequence has to be altered in such a way that the containers arrive at the cranes "just-in-time" – in the right order of the loading sequence. Waiting times of the cranes and vehicle congestions at cranes and in the yard blocks have to be avoided because both reduce productivity. The problem was solved by using algorithms applied to just-in-time machine scheduling problems.⁴

Double cycle mode

Double cycle mode combines the transports of export and import containers to/ from cranes operating at the same or neighboured ships. The fixed allocation of transport vehicles to cranes is given up, vehicles operate in a pool serving several cranes in alternative modes (loading or discharging). Empty dis-

tances and transportation times are reduced in double cycle mode. This mode is more efficient but harder to organize because of the higher complexity.

The potential for double cycle operation at the Burchardkai was found to be in the range of 15% to 30% with an average of about 23%. Because two empty ways are replaced by one travel connecting import and export containers transportation time can be reduced. In case of HHLA Burchardkai the reduction was in the range of 10%.

Objective of optimisation is to minimize the lateness of container deliveries to/ from the cranes. Similar to the single cycle mode the cranes are assumed to operate in a fixed frequency thus defining the time a container has to be dropped (export) or picked up (import) at the buffer below the crane. Minimizing the deviations from the fixed frequency is the goal for optimisation.

Calculations were made applying several algorithms to the problem. Best results were found with a heuristic (Steepest Descent) and a hybrid of a Genetic Algorithm with Tabu Search.⁵ The experiments revealed too that the productivity enhancements were only insignificantly dependant on the number of sequenced containers (planning horizon). This is important because it allows online optimisation where only a few containers are sequenced. Simulations were performed using the algorithms and real data of the Burchardkai to get a better confidence that implementing optimisation will result in a worth mentioning gain in productivity.⁶

Quayside Control System

Because of the complexity and dynamic of ship operation the control and opti-

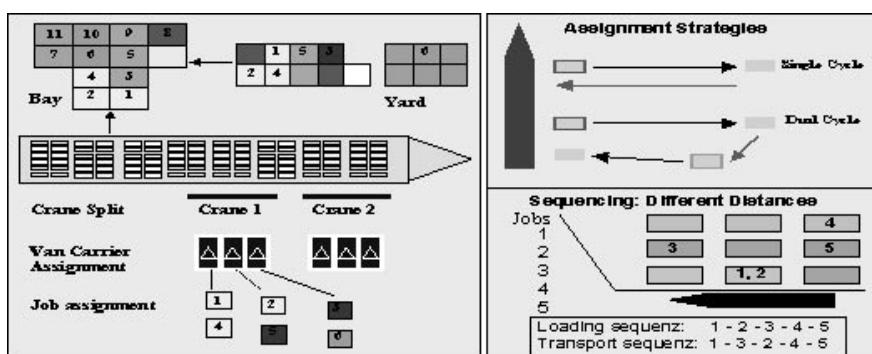


Fig. 5: Equipment and job assignment for ship operation - different modes of operation and order sequencing for different distances.

misation of straddle carriers has to be done online (in real-time). One reason for online optimisation is that yard positions for import containers can not be selected until they are unloaded and checked physically. Additionally circumstances can occur which make an immediate alteration of just calculated transport sequence necessary; for instance:

- interruptions of crane operation because of operational or technical disturbances
- change of loading/ unloading sequences during vessel operation because of crane driver's decision, ship stability, etc.
- stochasticity of landside container transport because of yard reshuffles, different distances, ways and velocities depending on drivers' decision and skill.

All reasons together make it necessary to restrict the planning horizon of optimisation to only a few containers; in practice two to six containers depending on the buffer capacity below the crane.

The full system for optimised straddle carrier operation at the quayside integrates optimisation methods and

- allows for different ways to assign straddle carriers to cranes (fixed assignment to one crane, assignment to several cranes, pooling restricted to one or several vessels) and
- supports several modes of operation like single cycle, double cycle or push and pull.

Modes of assignment and operation are set by selecting parameters of the system through the control staff. Several cranes can flexibly be pooled to

one 'working area' which is served by a number of straddle carriers. Normally a working area corresponds to one ship. The optimisation module calculates the transport sequences and allocates the next tasks to the straddle carriers. The architecture of the quayside optimisation and control system is identical to the hinterland system: a master routine permanently calculates the number of straddle carriers needed at a crane or a vessel and automatically shifts straddle carriers to where they are needed.

Human Factor: Motivation

Experiences we have made during the development and implementation of optimised control systems for man driven equipment like straddle carriers very clearly showed that the motivation of the drivers is fundamental for the benefits gained. An optimisation system not only depends on technical or mathematical terms but also on the social and cultural environment of labour. The system architecture has to reflect on it.

Some experiences and arguments illustrate this position:

- No optimisation system has any direct influence on the vehicles' speed nor on the way – this is a driver's decision
- Any mathematical method to calculate optimised routes enhances the frequency of jobs to be performed in a given time. The drivers' stress can be heightened even more. This can lead to a situation that optimisation is contra-productive.

Therefore the human factor has to be an integral part of a well functioning optimisation system. Discussions revealed that drivers are proud of their individual productivity – and this depends on the working area

because the operational conditions and constraints are specific. This is a main reason why drivers do not want to be shifted very often or even permanently between different working areas. They refuse to be only an anonymous number in a mere technical system. The HHLA solution reflects on this – the existing working areas are the base of optimisation as described in detail. Even more, the dynamic balancing system considers how often a driver was already 'balanced' before making a decision; vehicles which are seldom shifted are selected first.

A similar situation happens at the quayside. The fundamental units of straddle carrier employment comparable to the working areas of the hinterland are the ships. Straddle carrier drivers measure their individual productivity in relation to one ship – and the productivity depends on the ship's data. Straddle carrier assignment therefore normally should not exceed one ship. Occupation at different ships should be restricted to exceptions.

This is why an architecture is applied to the quayside routing which is similar to the hinterland: route optimisation for one ship, dynamic balancing between different ships. The same architecture can be used to integrate hinterland and quayside routing to build an integrated terminal routing system. This is the next step for the terminal optimisation system of HHLA.

Pooling versus Balancing – is Pooling Optimal?

The straddle carrier optimisation system of HHLA differs from what is commonly called a 'pooling system'. In a pooling system straddle carriers belong to one 'pool' while transportation orders created in the different working areas are

put into one and the same job queue. One algorithm has to calculate optimal or at least „good“ job sequences which are assigned to straddle carriers. Such a problem is very complex not only because the number of possible job combinations dramatically increases with the number of jobs⁷ but also because such a solution has to cover all possible operation modes of the different working areas; good models are hardly to develop. This often leads to a situation that heuristics are implemented which give minor results – especially under condition of real time processing.

Instead the principles of the HHLA routing and balancing system are:

- reduction of complexity through decomposition
- implementing algorithms which fit best the operational specifics of each working area
- a solution which guarantees high motivation of drivers.

Conclusion

Implementing mathematical methods of optimisation will result in an appreciable gain in productivity of straddle carrier operation. Developing optimised control systems for man driven equipment not only has to focus on mathematical or technical terms. It also has to take the human factor – motivation – into account. The system described reflects on it. Our experience is that optimisation systems with algorithms which are specific to each operation area have to be preferred to centralised pooling systems.

The algorithms applied to the straddle carrier optimisation are independent of the type of equipment. They can be applied to any type of transport and

stacking equipment like trailers, multi-trailers, AGVs, RMGs, RTGs, etc.

Footnotes

¹ Dirk Steenken, Latest operational Experience with Satellite Positioning Systems, www.hhla.de/Datenverarbeitung/

² Dirk Steenken, *Fahrwegoptimierung am Containerterminal unter Echtzeitbedingungen*, in, OR-Spektrum 14/ 1992, S. 161-168

³ Dirk Steenken, Andreas Henning, Stefan Freigang, und Stefan Voß, *Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves*, in, OR-Spektrum 15/ 1993, S. 167-172

⁴ Dirk Steenken, Thomas Winter, Uwe T. Zimmermann, *Stowage and Transport Optimisation in Ship Planning*, in Martin Götschel (Hrsg.): Online Optimisation of Large Scale Systems, Berlin-Heidelberg-New York, 2002.

⁵ The research was sponsored by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Results are published in: Böse, J.; T. Reiners, D. Steenken, S. Voß, *Vehicle Dispatching at Seaport Container Terminals Using Evolutionary Algorithms*. In: Spague, R.H. (Publ.), Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, DTM-IT: 1-10. IEEE, Piscataway.

⁶ Martinssen, D. ; D. Steenken, F.Wölfer, T.Reiners, S. Voß, *Einsatz bio-analoger Verfahren bei der Optimierung des wasserseitigen Containerumschlags*. In: Sebastian, H.-J., Grünert, T. (Hrsg.), Logistik Management – Supply Chain Management und e-Business, Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden, 2001.



By Dirk Steenken, (e-mail: steenken@hhla.de) Hamburger Hafen- und Lagerhaus AG (HHLA) - Informations Systems - Equipment Control/Automation

Dirk Steenken studied Physics at the Universities of Munich and Hamburg.

Presently he is IT-Manager at the Hamburger Hafen- und Lagerhaus AG (HHLA). His department cares for equipment control systems, automation and simulation. He specifically is engaged in developing systems which integrate mathematical methods of optimisation.

Dirk Steenken was responsible for the development of systems like: optimal scheduling of straddle carriers, satellite based container positioning (DGPS), and Ship, berth and yard planning systems integrating real time optimisation.

He has done several research projects on optimisation and automation sponsored by the German Federal Ministry of Research and Technology.

Dirk Steenken is member of the Advisory Board of the German Society for Operations Research (GOR).

linear
quadratic
conic
integer
nonlinear convex
optimization

From problems to answers



www.mosek.com

Interfaces:

- AMPL
- GAMS
- .NET
- JAVA
- MATLAB
- C/C++
- Fortran
- LP/MPS files

MOSEK ApS
telephone: +4539179907
email: sales@mosek.com
<http://www.mosek.com>

Anvendelse af kolonnegenerering ved udskæringsproblemer

DORS-pris vinderen 1998/99, Claus Gareissen, giver et overblik over brugen af kolonnegenerering ifm. to-dimensionale udskæringsproblemer. Teorien skitseres, og eksperimentelle resultater bekræfter metodens brugbarhed i praksis.

Introduktion

Som det kunne læses i ORbit nr. 1, modtog jeg i december 2001 DORS-prisen for det bedste speciale 1998/1999. I den forbindelse blev jeg opfordret til at skrive nærværende artikel om specialets emne: Anvendelse af kolonnegenerering til løsning af udskæringsproblemer. Artiklen giver et overblik over, hvordan forskellige typer udskæringsproblemer er defineret. Helt overordnet kan disse problemer inddeltes i to kategorier: Optimering af udskæring på en enkelt plade (CP) og optimering af udskæringer fordelt over flere plader (CSP). Det beskrives, hvordan kolonnegenerering på elegant vis danner sammenhæng mellem CP og CSP. Til sidst vises eksperimentelle resultater vedr. beregning af en nedre grænseværdi for CSP vha. kolonnegenerering.

Baggrund for specialet

I årene 1995 og frem arbejdede jeg ved siden af mit datalogistudium bl.a. som netværksadministrator og programmør for produktionsvirksomheden Jøni Foodline A/S (www.joni-foodline.dk). Virksomheden producerer gryder, stegepander m.m. til storkøkkener i Danmark og udlandet. Udstyret benyttes f.eks. i køkkener på sygehuse, kaserner og plejehjem.

En dag spurgte direktøren mig, om jeg ikke kunne løse »et lille problem« for ham: Virksomheden brugte under produktionen rektangulære rustfri stålplader i mange forskellige størrelser. Da virksomheden var ordreproducerende, var det økonomisk set ikke tilrådeligt at indkøbe stålpladerne i forud definerede mål. I stedet købte man store stålplader på 2 x 4 meter, som herefter kunne klippes til med en maskinsaks, efterhånden som behovet for mindre stålplader opstod. Problemets var nu at

planlægge, hvorledes de store stålplader skulle skæres ud i de påkrævede mindre stålplader, således at mindst mulig materiale gik til spilte. Minimering af spild ville mindske produktionsomkostninger og samtidigt være miljørigtigt.

Ovenstående problemstilling fangede min interesse og førte siden hen til min specialeafhandling [Gareissen98] ved Datalogisk Institut, Københavns Universitet (DIKU). David Pisinger var min vejleder under specialearbejdet, hvor jeg havde stor glæde af hans ekspertise inden for paknings- og udskæringsproblemer.

Oversigt over udskæringsproblemer

Paknings- og udskæringsproblemer udgør en af de væsentligste grupper af problemer inden for operationsanalyse. Gruppen indeholder nogle af de første problemer, der er blevet behandlet inden for operationsanalyse [Kantorovich39], og nogle af de mest udbredte kombinatoriske optimeringsproblemer. Således støder man på udskæringsproblemer i både træ-, metal-, tøj-, glas- og papirindustrien.

Som følge af udskæringsproblemets store udbredelse er mængden af problemvarianter og tilhørende litteratur inden for dette område enorm. Det er derfor på ingen måde hensigten her at give et fyldestgørende overblik over området. I stedet beskrives udvalgte begreber og problemstillinger inden for todimensional udskæring. For en mere fyldestgørende og systematisk klassificering henvises til [Dyckhoff90].

Klassificering af udskæringer

Lad os starte med at klassificere forskellige typer af

udskæringer. Ved udskæring af et materiale kan der helt overordnet være tale om 1-, 2- eller 3-dimensonal udskæring. Som eksempler på disse typer udskæringer kan f.eks. nævnes oversavning af jernstænger eller -rør (1D), klipning af metalplader (2D), udskæring af træplade med stiksav (2D) eller CNC-fræsning (3D).

Som i [Gareissen98] fokuseres der i denne artikel udelukkende på 2-dimensionale udskæringer. Disse udskæringer kan principielt klassificeres efter a) formen på de emner, der skal skæres ud, og b) formen på det udgangsmateriale, emnerne skæres ud af. I litteraturen er jeg dog kun stødt på eksempler, hvor udgangsmaterialet er rektangulært. Da dette må formodes at være gældende i langt de fleste tilfælde i praksis, antages i det følgende, at udgangsmaterialet altid er rektangulært.

Udgangsmaterialet kaldes derfor blot for "plade" i det efterfølgende.

Klassificering efter emnernes form er derimod meget relevant. Helt overordnet kan man skelne mellem,

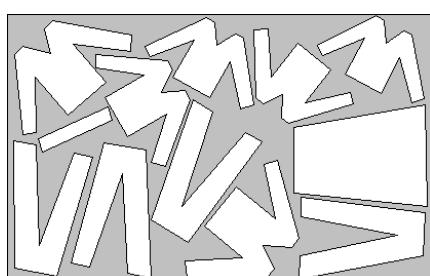


Fig. 1: Irregulær udskæring

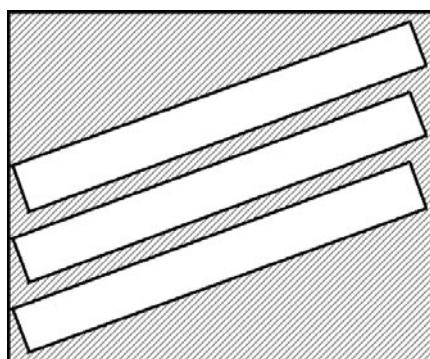


Fig. 2: Regulær, rektangulær udskæring

om emnerne kan antage en helt vilkårlig form (*irregulære udskæringer*), eller om formen er mere veldefineret (*regulære udskæringer*). En veldefineret form kunne f.eks. være, at alle emner skal være rektangler (*rektangulære udskæringer*). Figur 1 og figur 2 viser hhv. et eksempel på en irregulær og en regulær, rektangulær udskæring. Rektangulære udskæringer kan

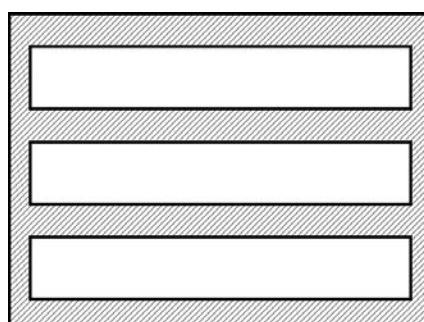


Fig. 3: Ortogonal udskæring

yderligere specialiseres som værende *ortogonale*. En ortogonal udskæring er kendtegnet ved, at alle snit i udskæringen er parallelle med en af pladens sider. Udskæringen i figur 3 er ortogonal - udskæringen i figur 2 er ikke. *Guillotine-udskæringer* udgør en meget vigtig specialisering af de ortogonale udskæringer. En guillotine-udskæring er defineret ved, at man starter med at foretage et ortogonalt snit, der går hele vejen igennem pladen, dvs. deler den rektangulære

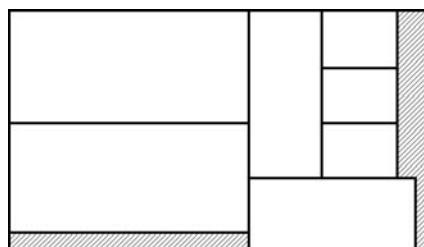


Fig. 4: Guillotine-udskæring

plade i to mindre rektangulære plader. Et sådant snit kaldes også for et *guillotine-snit*. Udskæringen fortsætter herefter udelukkende med guillotine-snit på de resulterende rektangulære

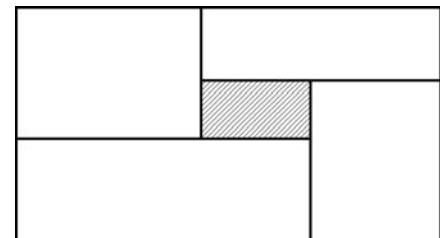


Fig. 5: Ortogonal udskæring, ej guillotine

plader, indtil de ønskede emner er skæret ud. Figur 4 viser et eksempel på en guillotine-udskæring, mens udskæringen i figur 5 er et eksempel på en ortogonal udskæring, der ikke kan udskæres vha. guillotine-snit. Figur 6 sammenfatter sammenhængen mellem de forskellige typer todimensionale udskæringer (Af figur 6 fremgår, at guillotine-udskæringer yderligere kan inddeltes i trinvise udskæringer. Dette beskrives ikke nærmere i denne artikel).

Guillotine-udskæringer er interessante af to årsager: 1) Der forekommer tilfælde i praksis, hvor man rent faktisk kun kan foretage guillotine-snit. Dette er f.eks. tilfældet ved klipning af metalplader med maskinsaks eller ved udskæring af træplader med en rundsav. 2) Guillotine-udskæringens rekursive definition gør, at guillotine-udskæringer fra et teoretisk synspunkt er betydelig nemmere at håndtere end de andre nævnte former for udskæringer. I specialet [Gareissen98] valgte jeg derfor udelukkende at fokusere på guillotine-udskæringer.

Klassificeringerne nævnt i dette afsnit, er dem som man støder oftest på i den "videnskabelige litteratur". I praksis findes der utallige andre begrænsninger, der kan gøre sig gældende. For blot at nævne ét eksempel, er det ved brug af maskinsakse typisk nødvendigt med en mindste afstand ud til kanten af pladen, for at et snit kan lade sig gøre.

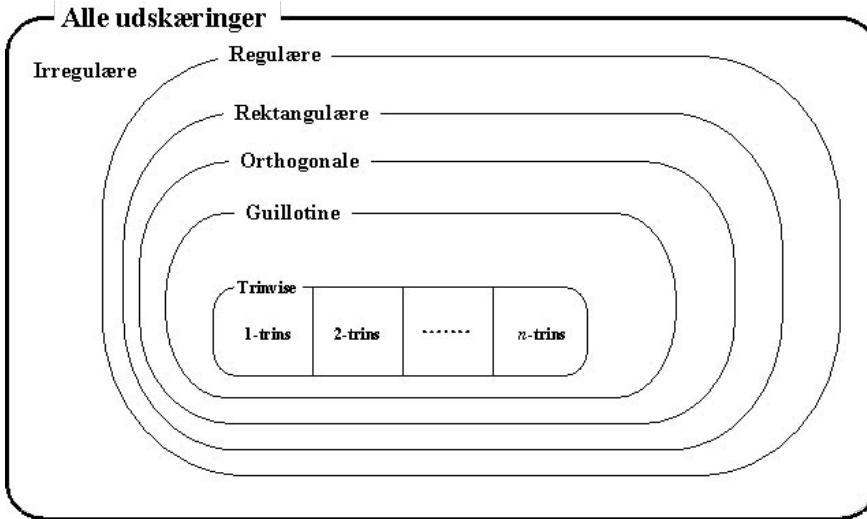


Fig. 6: Opdeling i forskellige typer udskæringer

Optimal udskæring af en enkelt plade

I dette afsnit defineres optimeringsproblemet vedr. udskæring af en enkelt plade (CP). Problemet kan formuleres på følgende måde: Der er givet n forskellige emner og en plade med målene $L \times B$.

Hvert emne i har en veldefineret form og en tilknyttet positiv profit p_i . Målet er nu at finde en udskæring af pladen, der maksimerer profiten - dvs. en udskæring der resulterer i 0, 1 eller flere af hvert af de givne emner, således at profitsummen af de udskårne emner maksimeres:

således at:

- 1) Der findes en lovlige udskæring, hvor det i te emne udskæres x_i gange for $i=1,\dots,n$.
- 2) $\text{for } i=1,\dots,n.$

Med "lovlige udskæring" menes i ovenstående, at emnerne kan skæres ud af en plade med målene $L \times B$, således at ingen emner "overlapper", og således at udskæringen overholder de udskæringsbetingelser, der måtte være givet (jf. de mulige betingelser beskrevet i afsnittet om klassificering af udskæringer). På engelsk kaldes ovenstående problemformulering ofte for Unconstrained Cutting Problem (UCP). "Unconstrained" refererer her til, at der

i problemformuleringen ikke er nogen eksplisit grænse for, hvor mange gange et emne må forekomme i en lovlige udskæring.

En beslægtet problemformulering er givet ved, at man til hvert emne i knytter en øvre grænse for, hvor ofte det må indgå i en lovlige udskæring, og erstatter ovenstående begrænsning 2) med for i . Denne problemformulering kaldes for Constrained Cutting Problem (CCP).

Eksempel 3-1: Lad os betragte et problemtilfælde af UCP, hvor kun guillotine-snit er tilladt. Pladen er givet ved $L \times B = 800 \times 500$, og 5

| Emne (i) | Længde | Bredde | Profit (p_i) |
|--------------|--------|--------|------------------|
| 1 | 345 | 132 | 45540 |
| 2 | 171 | 57 | 9747 |
| 3 | 300 | 120 | 36000 |
| 4 | 133 | 92 | 12236 |
| 5 | 430 | 145 | 62350 |

Tabel 1: Emner til eksempel 3-1.

rectangulære emner er givet ved tabel 1. Det specielle i dette tilfælde er, at hvert emnes profit er lig dets areal (profit = længde x bredde). Herved opnås, at maksimering af profiten = maksimering af udnyttet areal = minimering af spildarealet.

Dette kaldes for et *uvægtet problemtilfælde*. Hvis mindst ét af

| | | | | | |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 |
| 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 |
| 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 |
| 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 |
| 57 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 |
| 171 171 Emne 2 | 57 57 Emne 2 | 57 57 Emne 2 | 57 57 Emne 2 | 57 57 Emne 2 | 57 57 Emne 2 |
| 57 Emne 2 | 171 Emne 2 | 171 Emne 2 | 171 Emne 2 | 171 Emne 2 | 171 Emne 2 |

Fig. 7: Optimal udskæring til eksempel 3-1.

emnernes profit er forskellig fra emnets areal kaldes det for et *vægtet problemtilfælde*. En optimal løsning til eksemplet er vist i figur 7 med et spild på kun 1,35% af pladens areal.

Eksempel 3-2: Blot en lille ændring af emnernes profit kan resultere i en helt anden optimal løsning. Som eksempel kan vi benytte samme problemtilfælde som i eksempel 3-1, men reducere profitten for emnerne 2 og 4 med 10%. En optimal løsning til dette problemtilfælde er vist i figur 8. Ikke så overraskende ses, at emnerne 2 og 4 nu ikke længere indgår så mange gange i den optimale løsning.

| | | | | | |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 |
| 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 | 133 92 Emne 4 |
| 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 | 92 Emne 4 |
| 133 Emne 4 | 133 Emne 4 | 133 Emne 4 | 133 Emne 4 | 133 Emne 4 | 133 Emne 4 |
| 57 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 | 171 57 Emne 2 |
| 171 171 Emne 2 | 57 171 Emne 2 |
| Emne 2 Emne 2 | 57 Emne 2 | 57 Emne 2 | 57 Emne 2 | 57 Emne 2 | 57 Emne 2 |

Fig. 8: Optimal udskæring til eksempel 3-2

Kompleksitet

Generelt set hører både UCP og CCP til klassen af NP-hårde optimeringsproblemer. I langt de fleste problemtilfælde er man derfor nødsaget til at benytte heuristikker til gennemsøgning af løsningsrummet. Litteraturen omkring eksakte algoritmer til løsning af UCP og CCP beskæftiger sig næsten udelukkende med problemformuleringer, hvor "lovlige udskæringer" skal være ortogonale. En stor del af denne litteratur er yderligere begrænset til kun at betragte guillotine-udskæringer. Selv med denne begrænsning er UCP og CCP stadig NP-hårde. Det skal dog nævnes, at ved UCP med ortogonale snit er der en afgørende forskel i kompleksitet, afhængig af om der kun tillades guillotine-snit eller ej - problemet er da hhv. svagt og stærkt NP-hårdt. Dvs. ved guillotine-udskæringer kan problemet løses i pseudopolynomiel køretid. CCP er et stærkt NP-hårdt problem, selv hvis udskæringerne er begrænset til guillotine-snit.

Referencer

Der findes i litteraturen en del eksakte algoritmer til løsning af hhv. UCP og CCP, hvor løsningsrummet er begrænset til guillotine-udskæringer. Jeg vil her fremhæve nogle få udvalgte algoritmer:

- UCP: [Gilmore&Gomory66], [Herz72], [Beasley85], [Hifi&Zissimopoulos96a] og [Gareissen98].
- CCP: [Christofides&Whitlock77], [Wang83], [Viswanathan&Bagchi93], [Hifi&Zissimopoulos96b] og [Hifi97].

Optimal udskæring af flere plader

Ved UCP og CCP skal netop én given plade skæres ud i et ukendt antal emner. Vi skal nu se på en anden problemformulering, hvor problemstillingen er lige omvendt: Et kendt antal emner skal skæres ud i et ukendt antal plader.

Lad os definere dette mere præcist: Igen er der givet n emner med en veldefineret form, og pladens dimensioner $L \times B$ er givet. Men denne gang er der til hvert emne i knyttet et behov d_i , der angiver, hvor mange gange emnet mindst skal skæres ud. Det antages, at der er et vilkårligt antal plader til rådighed. En optimal løsning

er da defineret ved at finde en udskæring af en eller flere plader, der dækker hvert emne-behov, og som bruger så få plader som muligt. Dette kan beskrives ved nedenstående heltalsprogrammeringsmodel, hvor følgende variable benyttes: K er en øvre grænse for, hvor mange plader der skal udskæres i en optimal løsning. y^k er en binær variabel, der angiver, om den k 'te plade skal skæres ud ($y^k=1$), eller ej ($y^k=0$). $x_{i,k}$ angiver, hvor ofte det i 'te emne skal skæres ud af den k 'te plade.

således at:

- 1) $x_{i,k} \leq d_i y^k$ for $i=1,\dots,n$.
- 2) Der findes en lovlig udskæring, hvor det i 'te emne udskæres $x_{i,k}$ gange fra den k 'te plade for $i=1,\dots,n$ og $k=1,\dots,K$.
- 3) $\sum_k x_{i,k} = d_i$ for $i=1,\dots,n$ og $k=1,\dots,K$.
- 4) $y^k \leq 1$ for $i=1,\dots,n$.
- 5) $y^k \geq 0$ for $i=1,\dots,n$ og $k=1,\dots,K$.

Begrænsning 1) sørger for, at alle emner mindst skæres ud

så ofte, som det er påkrævet. Begrænsning 3) sørger for, at hvis en plade ikke indgår i løsningen, så må der ikke skæres emner ud af den.

Ovenstående problemformulering betegnes på engelsk ofte som *2D Cutting Stock Problem* (CSP). Problemet er tæt beslægtet med familien af Bin Packing problemer og er generelt set stærkt NP-hårdt.

Eksempel 3-3: Lad os betragte et meget simpelt problemtilfælde af CSP givet ved følgende:

- $L \times B = 9 \times 1$
- 2 rektangulære emner med dimensionerne 5×1 og 3×1 og emnebehov givet ved hhv. $d_1=3$ og $d_2=3$.

Dette problemtilfælde er reelt et 1-dimensionalt CSP-problem, da emnerne kun kan skæres ud i forlængelse af hinanden. Den optimale løsning til problemet er vist i figur 9.

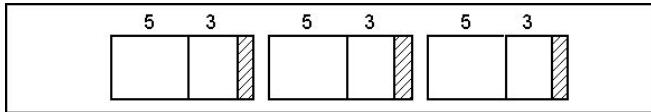


Fig. 9: Optimal løsning til eksempel 3-3

Sammenhæng mellem CP og CSP

Efter at have beskrevet problemerne CP og CSP, omhandlende optimering af udskæringer på hhv. en eller flere plader, vil vi nu undersøge, om der er en sammenhæng mellem disse problemer. Kan man med andre ord løse CSP ved brug af løsningsalgoritmer til CP?

Grådig algoritme

En oplagt måde at udnytte løsning af CP til løsning af CSP er at benytte en såkaldt grådig algoritme: Man kunne f.eks. iterativt finde den mest profitable udskæring af en enkelt plade ved at skære nogle af de emner ud, der stadig mangler at blive skæret ud i forhold til de givne emnebehov. Hver gang en optimal udskæring af en enkelt plade er fundet, reduceres de givne emnebehov med det antal, der blev skæret ud af pladen. Denne fremgangsmåde svarer til iterativt at løse et problemtilfælde af CCP, hvor man i hver iteration knytter en øvre grænse til hvert emne svarende til det resterende emne-behov. Et simpelt eksempel illustrerer princippet:

Eksempel 4-1: Betragt igen problemtilfældet fra eksempel 3-3. Hvis vi prøver først at finde en optimal udskæring af en

enkelt plade med mindst mulig spild, vil løsningen være at skære det mindste emne ud 3 gange. Herefter kan problemet reduceres til, at vi kun mangler at skære det største emne ud 3 gange. Ved iterativt at optimere udskæringen af en enkelt plade, fås til sidst løsningen vist i figur 10. Problemet er, at der i de sidste 3 iterationer kun kan placeres ét emne på hver plade. Den endelige løsning bliver derfor på 4 plader, mens den optimale løsning vist i figur 9 er på 3 plader. Som det fremgår af eksemplet, vil man ikke i almindelighed kunne finde en optimal løsning til CSP vha. en grådig heuristik. Problemet er typisk, at man ved denne fremgangsmåde kommer til at pakke de små emner tæt sammen på de første plader, hvorefter man står tilbage med de store emner, som til sidst må fordeles uhensigtsmæssigt med forholdsvis stort spild til følge.

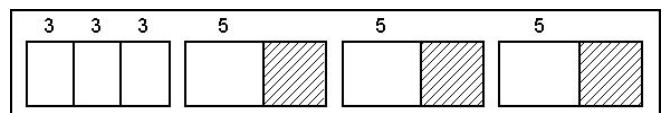


Fig. 10: Løsning til eksempel 4-1 fundet ved grådig heuristik

Dekomposition

Af forrige afsnit fremgår det, at man ved iterativt at finde optimale udskæringer af en enkelt plade risikerer kun at finde en suboptimal løsning af det totale problem. Man er derfor nødt til at "betragte alle de mulige udskæringer samtidigt" og sammensætte disse på en optimal måde. Men hvordan gør man dette?

For et givet problemtilfælde af CSP kunne man vælge at opremse alle lovlige udskæringer. Da emernes placering på pladen ikke indgår i objektfunktionen, er det kun nødvendigt at vide, hvilke emner der indgår i hver udskæring. Vi kan derfor vælge at repræsentere hver udskæring ved en n -dimensional vektor, hvor den i te komponent angiver, hvor mange gange det i te emne indgår i udskæringen.

Eksempel 4-2: Udskæringerne i figur 7 og figur 8 kan beskrives hhv. ved vektorerne: $(0, 14, 0, 16, 1)$ og $(3, 2, 6, 1, 0)$.

For et givet problemtilfælde af CSP vil vi i det følgende lade Q betegne mængden af alle de forskellige vektorer, der hører til alle lovlige udskæringer for det givne problemtilfælde. CSP kan da beskrives ved følgende *dekomponerede heltalsprogrammeringsmodel* M_{IP} :

således at:

- 1) for $i=1, \dots, n$.
- 2) for alle

Forklaring til modellen :

- betegner en n -dimensional vektor hørende til en lovlig udskæring i Q .

- Til hver vektor q er der knyttet en heltalsvariabel \underline{q} , der angiver, hvor ofte udskæringen hørende til q skal anvendes.

Det ses, at M_{IP} kan betragtes som en slags generaliseret *set covering model*, hvor højresiden af begrænsningerne i 1) dog kan antage vilkårlige positive heltalsværdier. Med andre ord beskriver modellen det faktum, at en optimal udskæring er givet ved at vælge færrest mulige udskæringer (vektorer) blandt alle lovlige, således at det givne emnebehov dækkes.

Det elegante ved M_{IP} i forhold til modellen i afsnittet om optimal udskæring af flere plader (side 19) er, at den dekomponerede model ikke eksplisit indeholder begrænsninger mht. hvordan en lovlig udskæring er defineret. Dette tages der hensyn til implicit, ved at alle lovlige udskæringer opremses i Q . M_{IP} er derfor helt generel og kan således benyttes til modellering af udskæringsproblemer af vilkårlig dimension, med vilkårlige udskærings-begrænsninger. Specielt kan M_{IP} benyttes til modellering af CSP med krav om guillotine-snit, hvor Q da er defineret som mængden af alle lovlige 2-dimensionale guillotineudskæringer hørende til det givne problemtilfælde.

Ulempen ved M_{IP} er dog, at antal variable, \underline{q} , i værste fald vil være eksponentielt voksende i forhold til n . Pga. *kombinatorisk ekspllosion* vil der selv for mindre problemtilfælde hurtigt være så mange udskæringsmuligheder,

at antal variable i M_{IP} bliver så stort, at modellen ikke umiddelbart kan benyttes i praksis til at finde en optimal løsning.

Kolonnegenerering

Selv om den dekomponerede model ikke umiddelbart kan bruges til løsning af CSP, kan vi dog bruge M_{IP} til beregning af en nedre grænseværdi for CSP. Til dette formål kan vi i M_{IP} erstatte begrænsning 2) med en kontinuert relaksering:

- 2) for alle

Herved fås nu en lineær programmeringsmodel M_{LP} . Lad os kalde optimum af denne model for $LB = \underline{LB}$. Der gælder da, at $LB = \underline{LB}$ er en nedre grænseværdi for optimum af M_{IP} - dvs. en nedre grænseværdi for CSP. M_{LP} har stadig det samme antal variable som M_{IP} - så hvad har vi vundet?

Det viser sig, at man i praksis meget ofte kan løse M_{LP} til optimum vha. kolonnegenerering, på trods af det store antal variable. Dette skitseres nedenfor.

En naiv måde at løse M_{LP} er først at generere mængden af alle de lovlige udskæringer Q , hvorefter modellen kunne løses vha. den reviderede simplex algoritme. Det er kendt, at simplex algoritmen i praksis ofte vil finde optimum uden tilnærmelsesvis at have inddraget alle variable i basis undervejs. Med andre ord er der mange variable - dvs. udskærings-vektorer - som simplex algoritmen med stor sandsynlighed slet ikke vil inddrage. Men hvorfor så generere mængden af alle lovlige udskærings-vektorer på forhånd?

Idéen med kolonnegenerering er netop hen ad vejen at generere vektorer hørende til lovlige udskæringer, efterhånden som det viser sig nødvendigt. I denne sammenhæng kalder man vektorerne for kolonner, da hver vektor

udgør en kolonne i den matrix, der udgør venstresiden i betingelsen 1) i M_{LP} . Heraf navnet *kolonnegenerering*.

Princippet for kolonnegenerering er skitseret i figur 11 på næste side. Man starter med kun at medtage en lille initiel delmængde af Q 's kolonner i modellen M_{LP} og løser så denne indskrænkede LP-model. Den initiale delmængde af kolonner kan f.eks. findes ud fra en heuristik til CSP.

Herefter tilføjer man iterativt en ny kolonne fra Q til den indskrænkede model, som løses ved re-optimering. Vores ønske er, at algoritmen skal stoppe, uden at alle kolonner fra Q bliver tilføjet modellen. Men hvordan kan vi opnå dette, og stadig med sikkerhed vide, at den fundne løsning er optimal for hele modellen med alle kolonnerne? Det afgørende er her, at vi fra teorien omkring lineær programmering ved, at en basisløsning er optimal, hvis ingen kolonner i modellen har en negativ reduceret omkostning ud fra de aktuelle duale variable. Dvs. hvis det kan garanteres, at ingen af de resterende kolonner i Q vil have en negativ reduceret omkostning, så er det unødvendigt at generere dem! Vælger vi altid at tilføje den kolonne fra Q , der har den mindste reducerede omkostning $b_j - \underline{LB}$, kan algoritmen således stoppes ved første iteration, hvor

Hvordan finder vi så i hver iteration den kolonne i Q , der ud fra de aktuelle duale variable har den mindste reducerede omkostning? Hvis de duale variable er givet ved b_1, \dots, b_n , så er den reducerede omkostning for en kolonne q givet ved

$b_j - \underline{LB}$. Dvs. kolonnen med

den mindst mulige reducerede omkostning er givet ved:

- 1)
- 2)

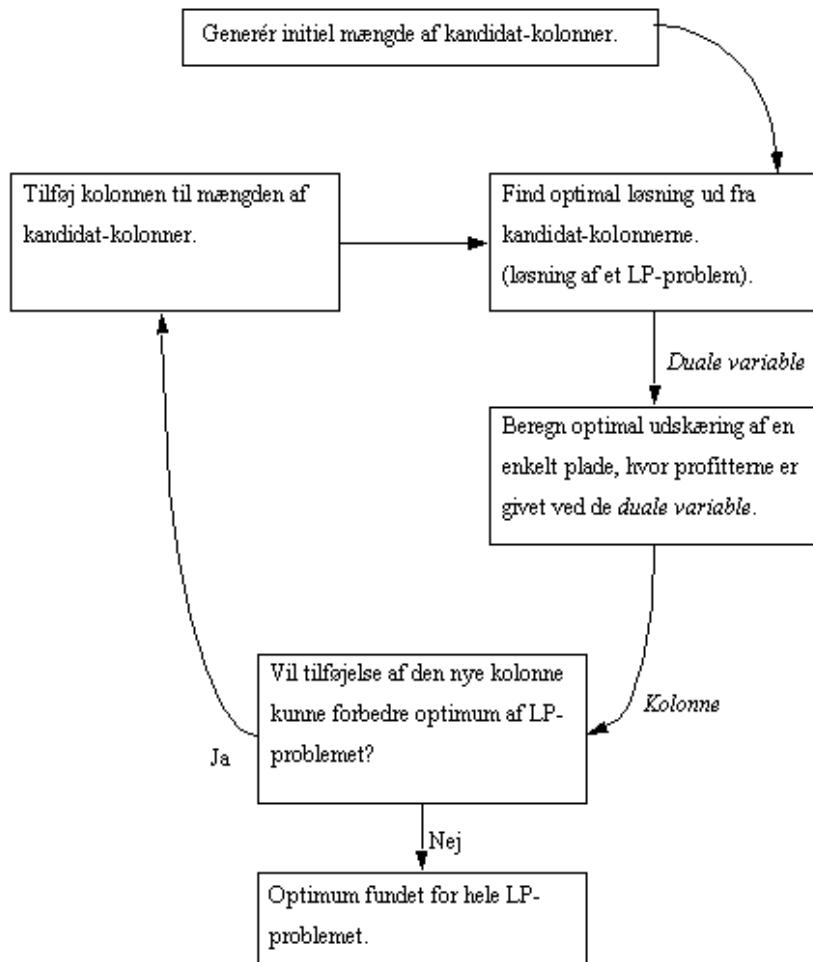


Fig. 11: Kolonnegenerering

Dette ses netop at være et problemtilfælde af UCP! Dvs. vi kan i hver iteration finde den næste kolonne ved at løse et problemtilfælde af UCP, hvor emnernes profit er givet ud fra de aktuelle duale variable. Så snart den bedst mulige udskæring har en profit på M_{LP} , kan kolonnegenereringen stoppe, og optimum af M_{LP} er fundet!

Af ovenstående fremgår det, at kolonnegenerering gør det muligt at løse hele modellen M_{LP} og finde optimum uden nødvendigvis eksplisit at skulle generere alle kolonnerne i modellen. Heraf ses, at kolonnegenerering på elegant vis danner sammenhæng

mellem CP og CSP: Ved iterativt at løse problemtilfælde af UCP, kan en nedre grænseværdi $LB =$ beregnes for CSP!

Ved beregning af LB er det ikke nødvendigt at kende den præcise værdi af men blot den oprundede værdi. Som beskrevet i [Gareissen98] kan dette udnyttes til at terminere kolonnegenereringen tidligere - dvs.

kan beregnes ved generering af færre kolonner end beskrevet ovenfor.

Kolonnegenerering i praksis

Som det fremgår af afsnittet om kolonnegenerering (side 21), er

kolonnegenerering en iterativ algoritme, hvor man i hver iteration skal foretage følgende:

1. Beregne næste kolonne ved at løse et problemtilfælde af UCP.
2. Reoptimere LP-modellen med den nye kolonne tilføjet.

Dvs. den totale køretid for kolonnegenereringen er i sidste ende afhængig af køretiden for disse to punkter. Jeg valgte i [Gareissen98] at bruge CPLEX 5.0 til reoptimering af LP-modellen. Det viste sig meget hurtigt, at køretiden til løsning af UCP i hver iteration dominerede den totale køretid. Derfor er succeskriteriet for at kunne løse kolonnegenereringen inden for rimelig køretid at have en god algoritme til løsning af UCP.

Et væsentligt bidrag i [Gareissen98] er netop, at der her beskrives en ny algoritme til løsning af UCP med krav om guillotine-snit, hvor køretiden er væsentlig bedre end ved tidligere algoritmer. Den nye algoritme gør det muligt at løse problemtilfælde med pladestørrelser op til 10.000×10.000 og op til 100 emner på under 1 minut i gennemsnit på en HP9000/C200¹.

Den forbedrede køretid til løsning af UCP gør det muligt i [Gareissen98] at løse kolonnegenereringen for problemtilfælde af CSP af praktisk relevans inden for rimelig køretid. Resultaterne af de omfangsrige eksperimenter, der herved kunne gennemføres, resumeres i nedenstående afsnit.

Eksperimenter med kolonnegenerering

I [Gareissen98] blev der genereret tilfældige problemtilfælde af CSP med rektangulære emner. Problemtilfældene

SOFTWARE

Hvem styrer tallene?



Hvordan kan vi sikre, at softwareløsninger, der er udviklet til at løse dagens problemer, kan forudse, hvad der sker i morgen. Det kan vi ikke. Løsninger er statiske. De kan ikke lære af erfaring og de udvikler sig ikke på egen hånd. Det er kun mennesket i stand til. Gamma Partner ApS tilbyder tilpasning og videreudvikling af allerede eksisterende softwaresystemer samt udvikling af nye. Vores speciale er software til brug inden for operationsanalyse, personale-planlægning, lønberegning og kvalitetssystemer.

| n | R | | r | | t (s) | cols | LB=UB | UB-LB=1 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 10 | 1000 | 10 | 0,05 | 100 | 0,07 | 5,68 | 48 | 2 |
| 10 | 1000 | 100 | 0,05 | 1000 | 0,12 | 6,22 | 47 | 3 |
| 10 | 1000 | 1000 | 0,05 | 10000 | 0,13 | 6,44 | 48 | 2 |
| 10 | 4000 | 10 | 0,05 | 100 | 0,13 | 6,56 | 48 | 2 |
| 10 | 4000 | 100 | 0,05 | 1000 | 0,19 | 6,74 | 48 | 2 |
| 10 | 4000 | 1000 | 0,05 | 10000 | 0,18 | 7,06 | 47 | 3 |
| 20 | 1000 | 10 | 0,05 | 200 | 0,66 | 19,86 | 47 | 3 |
| 20 | 1000 | 100 | 0,05 | 2000 | 0,97 | 21,28 | 46 | 4 |
| 20 | 1000 | 1000 | 0,05 | 20000 | 1,00 | 21,58 | 46 | 4 |
| 20 | 4000 | 10 | 0,05 | 200 | 1,43 | 21,20 | 46 | 4 |
| 20 | 4000 | 100 | 0,05 | 2000 | 1,58 | 20,96 | 49 | 1 |
| 20 | 4000 | 1000 | 0,05 | 20000 | 1,59 | 21,50 | 47 | 3 |
| 30 | 1000 | 10 | 0,05 | 300 | 13,55 | 46,24 | 42 | 8 |
| 30 | 1000 | 100 | 0,05 | 3000 | 19,08 | 46,52 | 39 | 11 |
| 30 | 1000 | 1000 | 0,05 | 30000 | 18,69 | 46,90 | 42 | 8 |
| 30 | 4000 | 10 | 0,05 | 300 | 16,36 | 45,10 | 39 | 11 |
| 30 | 4000 | 100 | 0,05 | 3000 | 36,55 | 47,26 | 41 | 9 |
| 30 | 4000 | 1000 | 0,05 | 30000 | 32,43 | 48,88 | 45 | 5 |
| 10 | 1000 | 10 | 0,10 | 100 | 0,05 | 6,44 | 49 | 1 |
| 10 | 1000 | 100 | 0,10 | 1000 | 0,06 | 6,82 | 49 | 1 |
| 10 | 1000 | 1000 | 0,10 | 10000 | 0,06 | 6,96 | 48 | 2 |
| 10 | 4000 | 10 | 0,10 | 100 | 0,10 | 6,80 | 49 | 1 |
| 10 | 4000 | 100 | 0,10 | 1000 | 0,11 | 6,78 | 49 | 1 |
| 10 | 4000 | 1000 | 0,10 | 10000 | 0,12 | 6,86 | 48 | 2 |
| 20 | 1000 | 10 | 0,10 | 200 | 0,36 | 21,32 | 48 | 2 |
| 20 | 1000 | 100 | 0,10 | 2000 | 0,51 | 24,60 | 43 | 7 |
| 20 | 1000 | 1000 | 0,10 | 20000 | 0,50 | 23,78 | 45 | 5 |
| 20 | 4000 | 10 | 0,10 | 200 | 0,82 | 22,32 | 48 | 2 |
| 20 | 4000 | 100 | 0,10 | 2000 | 1,03 | 24,56 | 46 | 4 |
| 20 | 4000 | 1000 | 0,10 | 20000 | 0,99 | 23,92 | 45 | 5 |
| 30 | 1000 | 10 | 0,10 | 300 | 2,31 | 40,52 | 44 | 6 |
| 30 | 1000 | 100 | 0,10 | 3000 | 3,03 | 43,84 | 46 | 4 |
| 30 | 1000 | 1000 | 0,10 | 30000 | 3,32 | 43,82 | 45 | 5 |
| 30 | 4000 | 10 | 0,10 | 300 | 4,23 | 41,62 | 44 | 6 |
| 30 | 4000 | 100 | 0,10 | 3000 | 5,38 | 44,00 | 44 | 6 |
| 30 | 4000 | 1000 | 0,10 | 30000 | 5,37 | 43,68 | 43 | 7 |

Tabel 2: Resultat af eksperimenterne i [Gareissen98].

blev grupperet efter følgende karakteristika:

- n: Antal rektangulære emner.
- R: En konstant, der bestemmer pladens størrelse. Således blev

størrelse valgt tilfældigt, således at og

- r: En konstant, der bestemmer emnernes størrelse. Således blev

emnernes dimensioner valgt tilfældigt, således at hver emnes længde og bredde hhv. lå i intervallet og .

- : Gennemsnitligt behov per emne. Hvert emnes behov blev valgt tilfældigt, således at var opfyldt. Størrelsen angiver dermed i hvert problemtilfælde det totale antal emner, der skal skæres ud.

De genererede problemtilfælde blev opdelt i grupper med følgende karakteristika:

, og . Inden for hver gruppe blev der genereret 50 tilfældige problemtilfælde. Dvs. i alt blev der genereret 1800 problemtilfælde.

For hvert problemtilfælde blev $LB =$ beregnet vha. kolonnegenerering, hvor »lovlige udskæringer« var begrænset til guillotine-udskæringer. Resultatet af eksperimenterne ses i tabel 2. Her betegner t den gennemsnitlige køretid i sekunder for, hvor lang tid det tog at beregne LB vha. kolonnegenerering på en HP9000/C200. »cols« angiver, hvor mange kolonner det i gennemsnit var nødvendigt at generere.

Ud over de målte størrelser beskrevet ovenfor, blev kvaliteten af LB også målt i [Gareissen98] ved for hvert problemtilfælde at finde en øvre grænseværdi vha. en heuristik. Det viste sig, at kvaliteten af LB er meget god i praksis. Kolonnen » $LB=UB$ « i tabel 4-1 angiver antal problemtilfælde inden for hver gruppe, hvor LB var lig med den øvre grænseværdi og dermed lig med optimum for CSP. Kolonnen » $UB-LB=1$ « angiver antal problemtilfælde, hvor den øvre grænseværdi var 1 større end LB - dvs. LB afveg højst med 1 plade fra optimum. Der var ikke ét tilfælde ud af

de 1800 genererede problemtilfælde, hvor LB afveg med mere end 1 plade fra optimum.

Eksperimenterne i [Gareissen98] viser således, at LB er en enddog meget god nedre grænseværdi for CSP i praksis.

Branch-and-price

Efter at have vist, at man kan beregne en meget god nedre grænseværdi for CSP vha. kolonnegenerering, ville en oplagt tanke være følgende: At løse CSP eksakt ved at inddarbejde den nedre grænseværdi i en branch-and-bound (B&B) algoritme. En sådan algoritme, hvor man i hver knude af søgerætten benytter kolonnegenerering til bestemmelse af en grænseværdi til forkastelse af grene, kaldes også for en *branch-and-price* algoritme.

Desværre viser det sig at være meget svært at forene principperne fra B&B med kolonnegenerering. Problemet er, at når man ved B&B forgrenet ned igennem søgerætten, foretages dette ved at tilføje begrænsninger til M_{LP} , hvorefter løsningsrummet rekursivt opspilles i mindre dele. Disse begrænsninger føres direkte videre til den relakserede model M_{LP} , hvorefter kolonnerne i modellen får tilføjet ekstra komponenter. Dvs. at mængden Q over lovlige kolonner modificeres, efterhånden som der forgrenes i søgerætten. Jo flere begrænsninger der tilføjes, desto mere kompliceret vil mængden Q 's struktur blive. Som følge heraf vil strukturen af det optimeringsproblem, der skal løses til generering af næste kolonne i kolonnegenereringen, kunne ændre sig radikalt: Der vil ikke længere nødvendigvis være tale om et problemtilfælde af UCP, men et andet beslægtet problem med ekstra begrænsninger. Køretiden til løsning af kolonnegenereringen kan herved vokse meget voldsomt, efterhånden

som der forgrenes dybere ned i søgerætten. I sidste ende kan dette betyde, at det bliver umuligt at benytte fremgangsmåden i praksis.

I det 1-dimensionale tilfælde af CSP er det med succes lykkedes at konstruere branch-and-price algoritmer. Her vil jeg nævne [Vance96] og specielt fremhæve [Vanderbeck96].

Et væsentligt bidrag i [Gareissen98] er, at det her lykkedes for det 2-dimensionale tilfælde af CSP med krav om guillotine-snit at konstruere en branch-and-price heuristik, der var i stand til at finde optimum for mange problemtilfælde. Kolonnen "LB=UB" i tabel 4-1 angiver således antal tilfælde inden for hver gruppe af 50 eksperimenter, hvor det var muligt at finde optimum. Kolonnen "UB-LB=1" angiver de resterende tilfælde, hvor heuristikken var i stand til at finde en løsning, der afveg med højst 1 plade fra optimum.

Sammenfatning

I denne artikel blev beskrevet, hvordan to udbredte typer optimeringsproblemer inden for udskæring er defineret. Problemerne vedrører hhv. optimal udskæring af en enkelt plade ud fra et antal givne emner (CP) og udskæring af et minimalt antal plader, således at nogle givne emne-behov dækkes (CSP). Det blev demonstreret, hvordan kolonnegenerering gør det muligt at beregne en nedre grænseværdi for CSP ved iterativt at løse problemtilfælde af CP.

Af eksperimenter foretaget i [Gareissen98] fremgår det, at hvis man begrænser løsningsrummet til guillotine-udskæringer, så gælder 1) grænseværdien kan beregnes inden for rimelig tid for praktiske problemtilfælde,

og 2) grænseværdien er meget tæt på optimum - og ofte lig med optimum - for praktiske problemtilfælde.

Litteraturliste

[Beasley85]: Beasley, J. E. (1985). Algorithms for Unconstrained Two-Dimensional Guillotine Cutting, Journal of the Operational Research Society, 36, 297-306.

[Christofides&Whitlock77]: Christofides, N. & Whitlock, C. (1977). An Algorithm for Two-Dimensional Cutting Problems, Operations Research, 25, 30-44.

[Dyckhoff90]: Dyckhoff, H. (1990). A Typology of Cutting and Packing Problems, European Journal of Operational Research, 44, 145-159.

[Gareissen98]: Gareissen, Claus Rosendal (1998). Løsning af det todimensionale guillotinepladeudskæringsproblem vha. kolonnegenerering (specialeafhandling), Datalogisk Institut, Københavns Universitet, Rapport 98/26, ISSN 0107-8283.

[Gilmore&Gomory66]: Gilmore, P.C. & Gomory, R.E. (1966). The Theory and Computation of Knapsack Functions, Operations Research, 14, 1045-1074.

[Herz72]: Herz, J.C. (1972). Recursive Computational Procedure for Two-Dimensional Stock Cutting, IBM Journal of Research and Development, 16, 462-469.

[Hifi97]: Hifi, M. (1997). An Improvement of Viswanathan & Bagchi's Exact Algorithm for Constrained Two-Dimensional Cutting Stock, Computers and Operations Research, 24, 727-736.

[Hifi&Zissimopoulos96a]: Hifi, M. & Zissimopoulos, V. (1996). A Recursive Exact Algorithm for Weighted Two-Dimensional Cutting, European Journal of Operational Research, 91, 553-564.

[Hifi&Zissimopoulos96b]: Hifi, M. & Zissimopoulos, V. (1996). Constrained Two-Dimensional Cutting: An Improvement of Christofides and Whitlock's Exact Algorithm, Journal of the Operational Research Society, 47, 1-8.

[Kantorovich39]: Kantorovich, L. V. (1960). Mathematical Methods of Organising and Planning Production, Management Science, 6, 366-422. Oversættelse af rapport præsenteret i 1939 ved Leningrad State University.

[Vance96]: Vance, P. H. (1996). Branch-and-Price Algorithms for the One-Dimensional Cutting Stock Problem, Working Paper.

[Vanderbeck96]: Vanderbeck, F. (1996). Computational Study of a Column Generation Algorithm for Bin Packing and Cutting Stock Problems, Research Papers in Management Studies, 14, University of Cambridge.

[Viswanathan&Bagchi93]: Viswanathan, K. V. & Bagchi, A. (1993). Best-First Search Methods for Constrained Two-Dimensional Cutting Stock Problems, Operations Research, 41, 768-776.

[Wang83]: Wang, P.Y. (1983). Two Algorithms for Constrained Two-Dimensional Cutting Stock Problems, Operations Research, 31, 573-586.

Fodnoter:

¹For mere detaljerede oplysninger om disse eksperimenter henvises til [Gareissen98].



Af cand.scient.dat. Claus Rosendal Gareissen (email: crg@conecto.dk), Conecto ApS.

Claus R. Gareissen er partner i IT-konsulenthuset Conecto ApS (www.conecto.dk) og fungerer som udviklingsansvarlig. Conecto ApS beskæftiger sig primært med konsulentorienteret systemudvikling og IT-drift.

Masterkursus med professor David Ryan

Den store ISMP-konference, der i august finder sted på DTU i Lyngby, tiltrækker mange kendte forskere inden for operationsanalyse.

En af disse er professor David Ryan fra Auckland University i New Zealand. Han er kendt for sit pioner-arbejde i avancerede optimeringsprincipper ifm. løsning af især mandskabs- og produktionsplanlægning. Han er bl.a. hovedmanden bag det automatiske mandskabsplanlægningssystem der anvendes af Air New Zealand.

Ikke alene er David Ryan blandt de førende OR-forskere i verden, men han er tillige en formidabel formidler og underviser – i 2002 modtog han således INFORMS' pris som bedste under-

viser af anvendt operationsanalyse.

DORS og IMM ved DTU arrangerer et intensivt to-dages kursus med David Ryan med titlen »Scheduling and the Set Partitioning Model«. Kurset finder sted den 25. og 26. august fra kl. 9 til 15 begge dage på DTU (lokale vil i starten af august fremgå af DORS' hjemmeside). Kurset er gratis for alle. Tilmelding er dog nødvendigt og kan foretages ved at sende en email til dors@dorsnet.dk eller pr. telefon til Jesper Larsen (4525 3385). Tilmeldingsfrist er mandag den 18. august.

Uanset ens OR-kundskaber er, får alle noget ud af David Ryans undervisning. Deltagerne antages således kun at have en grundlæggende forståelse af



David Ryan holder masterkursus i optimering i dagene 25. - 26. august

linær programmering og optimering.

I løbet af de to dage vil David Ryan gennemgå, hvordan man i forbindelse med industrielle applikationer kan anvende avancerede optimeringsmetoder. Flere informationer findes på DORS' hjemmeside. [jl]

Referat fra generalforsamlingen i Dansk Selskab for Operationsanalyse den 28. april 2003

Tilstede fra bestyrelsen:

Søren Nielsen (SN), Morten Gjølbye Madsen (MGM), Allan Larsen (ALA)
René Munk Jørgensen (RMJ), Jakob Birkedal Nielsen (JBN), Jesper Larsen (JLA), Niklas Kohl (NK) (slutningen af mødet)

1: Velkomst: Formanden bød velkommen.

2: Valg af dirigent og referent: SN blev valgt som dirigent. MGM blev valgt som referent.

3: Beretning for 2002: SN gennemgik beretningen. År 2002 vil blive husket for DORS 40 års jubilæum, som blev fejret på behørig vis. År 2002 var ligeledes året, hvor ORbit blev startet. Med hensyn til arrangementer var 2002 også et godt år. Der er blevet afholdt 5 arrangementer i form af seminarer og virksomhedsbesøg. Derudover blev der i foråret afholdt en præsentation af ILOG.

I 2002 har der været en markant medlemsfremgang med hensyn til firma-medlemmer og studentermedlemmer. Der er nu 99 personlige medlemmer, 28 studerende, 7 institutter og 9 firmamedlemmer.

Økonomisk gik det lidt bedre end ventet. Der var budgetteret med et underskud på 20.000 kroner, men det blev kun på 15.000 kroner.

Det blev kommenteret, at der i EURO foregår mange væsentlige ting.

Potentialet er større, hvis DORS gjorde mere ud af det.

Hele beretningen kan læses på DORS hjemmeside (www.dorsnet.dk).

4: Regnskab for 2002: RMJ gennemgik regnskabet. Generelt er indtægterne større end ventet. Det skyldes dels, at medlemmerne er blevet bedre til at betale deres kontingent, og dels at DORS er blevet bedre til at kradse gammel gæld ind. På udgiftssiden er de to største poster: *Arrangementer* og *ORbit*. Her har der været følgende udgifter: jubilæum (7.500 kroner), Sandbjerg (6.500 kroner), andre arrangementer (1.000 kroner), ORbit: 2 numre (30.000 kroner), software (15.000 kroner).

Regnskabet er blevet godkendt af DORSs revisor Susanne Helfeldt.

5: Budget for 2003: ALA gennemgik budgettet. Der budgetteres med et underskud på 3.500 kroner. På udgiftssiden er de store poster *Arrangementer*, *ORbit* samt specielle arrangementer/profilering i forbindelse med ISMP. Der er ikke budgetteret med et Sandbjerg-arrangement. Hvis et sådant bliver afholdt vil det også blive udgifts-neutralt for DORS.

Generalforsamlingen tog budgettet til efterretning.

6: Medlemmers forslag til fremtidige arrangementer:

Der bør være flere virksomhedsbesøg, da disse altid er vellykkede. Det blev diskuteret om hvorvidt DORS skulle gå mere aktivt ind i promovering af OR overfor potentielle virksomheder. Der var ikke nogen konklusion.

7: Fastsættelse af kontingent

for 2004: Efter en kort diskussion indstillede bestyrelsen til uforandrede kontingentsatser.

8: Valg af bestyrelsesmedlemmer for de kommende to år: ALA, MGM og NK var på valg, og alle tre ønskede at genopstille. De blev valgt.

Christina S. Nielsen ønskede at udtræde af bestyrelsen ét år før hendes periode udløber. JBN overtager hendes plads. Med den nye sammensætning mangler bestyrelsen undtagelsesvist ét medlem fra Jylland.

9: Valg af revisor: DORS nuværende revisor Susanne V. Helfeldt genopstillede og blev valgt.

10: Eventuelt: Intet.

Route2003 - Workshop om optimering og ruteplanlægning.



3 år efter den første workshop i ruteplanlægning på Roligheden kursuscenter i Skodsborg i august 2000 vendte workshoppen efter tilbage til lokaliteterne lige ved Øresund. De seneste resultater fremlagt og diskuteret i fra den 22. juni til 25. juni.

Workshoppen blev som sidst organiseret af professor Oli Madsen fra Center for Trafik og Transport (CTT) ved Danmarks Tekniske Universitet, og som i 2000 var det også i år lykkedes at trække nogle af de »tunge drenge« indenfor feltet til Danmark. Således deltog William J. Cook fra Georgia Tech. og Warren B. Powell fra Princeton University sammen med en række danske og udenlandske kollegaer inden for området.

Komplekse udvidelser

Inden for ruteplanlægning bød workshoppen på en markering af en ny trend. I mange år var de eksakte og matematisk funderede metoder henvist til at blive brugt på »akademiske« varianter af ruteplanlægningproblemer. Alle praktiske problemstillinger blev løst vha. simple indsættelsesheuristikker eller i få tilfælde avancerede metaheuristikker. Nu forsøger forskere at inkludere mere avancerede problemstillinger i

den teoretiske forskning. Således talte Daniele Vigo fra Italien om inkludering af 2-dimensionale pakningsbeslutninger i forbindelse med ruteplanlægning således at man overvejer pakningen af lastbiler *samtidig* med ruteplanlægningen, og Mikael Rönnqvist fra Sverige havde eksempler på integration af produktion og transportoptimering fra den svenske skovindustri (se f.eks. ORbit nr. 2).

En halv milliard byer

En problemstilling som stadig kan fascinere forskere er TSP (the Travelling Salesmans Problem) eller den rejsende sælgers problem. Inden for dette felt er William Cook en af verdens førende forskere. Sammen med en lille gruppe kollegaer har han i over 10 år til stædtet udfordret grænsen for, hvor store TSP-problemer, der kan løses til optimalitet. Til dette formål bruges enorme mængder computerkraft spredt over en række amerikanske universiteter. Størrelserne på problemstillingerne har nået et niveau hvor den oprindelige analogi ikke længere holder. Til gengæld er der brug for at løse TSP-problemer med over 50000 knuder i forbindelse med design af chips og processorer, og inden for bioteknologien fremkommer også nye problemstillinger, hvor TSP indgår som et vigtigt underproblem.

På nuværende tidspunkt er man i færd med at finde TSP-touren for de 528.280.881 stjerner der er i mælkevejen. I forbindelse med dette arbejde medvirker Keld Helsgaun fra Roskilde Universitetscen-

ter, idet han pt. har konstrueret den bedste heuristik til TSP som bruges til at beregne en øvre grænse. Cook og co. bruger hundredvis af computere i netværk over hele USA for at løse problemet og dertil er det muligt for folk på Georgia Tech. at hjælp med ved at downloade en særlig screensaver. Efter over 80 mill. CPU sekunder (926 CPU-døgn) er man nu under 0,8% fra optimum!

Anvendt forskning

Workshoppen viste muligheder for anvendelse af avanceret forskning ifm. praktiske problemer. Selv om der var en dag specielt tilegnede de anvendelsesorienterede foredrag var det småt med deltagere fra det danske erhvervsliv. De gik bla. glip af at høre Søren Nielsen fra eGruppen, som fortalte om ruteplanlægning hos GASA, Dirk Steenkens kompetente foredrag om ressourceoptimering i verdens 8. største havn (Hamburg) og Amelia Regans foredrag om brug af optimering i forbindelse med transportselskabers bud ved licitation af transportopgaver. [jla]



Workshoppenes deltagere samlet til gruppefoto.