

EEN GEHEELTALLIG LINEAIR PROGRAMMERINGSMODEL T. B. V. HET BEPALEN
VAN DE OPTIMALE SAMENSTELLING EN VOLGORDE VAN FOLIËN IN EEN
LAMINAAT

P. van Beek
C. J. Kerkhoven
C. W. D. M. van Rooij

SAMENVATTING

Bij ICI worden verschillende typen foliën geproduceerd, die m.b.v. speciale laminatie technieken tot eindprodukten verwerkt kunnen worden. Onder laminatie worden technieken verstaan die verschillende lagen folie tot een eindprodukt of laminaat samensmelten. Bij de vervaardiging van laminaten zijn de eigenschappen van samenstellende foliën afzonderlijk, en in combinatie met elkaar van doorslaggevend belang voor de uiteindelijke eigenschappen van het laminaat. De in dit artikel te behandelen problematiek spitst zich toe op de vraag uit welke foliën een laminaat dient te zijn samengesteld, zodat het laminaat voldoet aan alle daaraan gestelde eisen en bovendien de totale kosten van het uit de samenstellende foliën opgebouwde laminaat zo laag mogelijk zijn. In eerste instantie was het niet mogelijk een O.R. model te ontwerpen, dat de genoemde problematiek kon beschrijven en werd een poging gedaan met behulp van Artificial Intelligence tot een oplossing te komen. Om efficiency redenen leverde ook dit geen bevredigende resultaten, zodat wederom is geprobeerd met behulp van een O.R. techniek een passend model te ontwerpen, en dit maal met succes. Met een speciale formulering, welke in dit artikel uiteen wordt gezet, bleek het probleem oplosbaar met behulp van Geheeltallige Lineaire Programmering (GLP). Bedrukbaarheid en chemische resistentie, eigenschappen die de volgorde van de foliën betreffen, vereisen echter een speciale aanpak.

Prof. dr. P. van Beek. Landbouw Universiteit Wageningen, Vakgroep Wiskunde, Sectie Operationele Analyse, Dreyenlaan 4, 6703 HA Wageningen, 08370-82387.

Ir. C. J. Kerkhoven. ICI Holland B.V., Information Planning & Services Group, Postbus 551, 3000 AN Rotterdam, 010-4171209.

Ir. C. W. D. M. van Rooij, ICI Holland B.V., Europa Commercial Systems Department, Postbus 551, 3000 AN Rotterdam, 010-4171911.

1. INLEIDING

Laminatie is een procédé waarbij - uitgaande van een aantal enkel-lagige kunststof foliën - een meer-lagige folie (laminaat) wordt gevormd met unieke eigenschappen.

Bij uitwerking van het probleem blijken de volgende combinaties van foliën mogelijk te zijn (n is het aantal foliën dat beschikbaar is):

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| - tweelagig laminaat $n*n$ | mogelijke combinaties |
| - drielagig laminaat $n*n*n$ | mogelijke combinaties |
| - vierlagig laminaat $n*n*n*n$ | mogelijke combinaties |

Het totaal aantal te onderzoeken combinaties bij maximaal 4 lagen bedraagt derhalve:

$$\sum_{i=1}^3 n^{i+1}$$

Er zijn ruim 160 verschillende typen folie beschikbaar. In de praktijk is het mogelijk dit aantal te reduceren tot maximaal 80 typen folie.

De vraagstelling luidt nu als volgt: met welke foliën dient elk van de vier lagen 'gevuld' te worden, zodanig dat de kostprijs van het laminaat zo laag mogelijk is en zodanig dat aan een aantal technische/marktkundige specificaties voldaan wordt.

In eerste instantie is getracht met behulp van een expert systeem (rule based reasoning) dit probleem aan te pakken. Omdat er in totaal maar negen selectiecriteria zijn (zie schema 2) ontstaat er een zeer platte boom waarin vele korte paden van probleem tot oplossing leiden. Een expert systeem dat gebruik maakt van deze negen selectiecriteria bevat dan ook equivalente regels voor iedere folie, waardoor het totaal aantal regels erg groot wordt en grote delen van de zoekboom in zijn totaliteit moeten worden doorgelopen. Het gebruik van meta-regels had hierbij behulpzaam kunnen zijn, maar helaas waren er geen experts die deze meta-regels konden geven. Was dit wel het geval geweest, dan hadden grote delen van de boom direct kunnen worden afgekap.

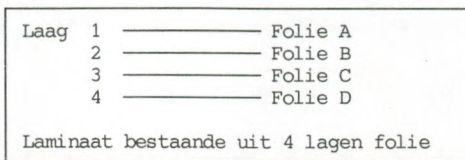
In tweede instantie leek ook de Operations Research niet te kunnen helpen. Er moet namelijk niet alleen rekening worden gehouden met welke foliën deel uit gaan maken van het laminaat, maar ook met de volgorde in het laminaat. Gezien de aard van het probleem leek een Geheeltallig Lineair Programmerings Model voor de hand te liggen, maar de gangbare modellen houden geen rekening met het volgorde probleem tijdens de optimalisatie. Nadat een speciale formulering van dit probleem in de vorm van een Lineair

Programmeringsmodel was gevonden, bleek op een oplossing gerealiseerd te kunnen worden die wel de vereiste efficiëncy bezat.

In dit artikel zal eerst in detail het probleem worden beschreven, vervolgens wordt een GLP model geformuleerd. Bekeken wordt tevens of het GLP model vereenvoudigd kan worden. Hierna worden de resultaten van het model gepresenteerd. Het artikel wordt afgesloten met een conclusie.

2. GEDETAILEERDE PROBLEEMBESCHRIJVING

Laten we uitgaan van een verpakkingsmateriaal voor een bepaald produkt. De eisen die aan dit verpakkingsmateriaal (in ons geval het laminaat) worden gesteld zijn maatgevend voor het aantal te gebruiken foliën, de typen te gebruiken foliën, en de volgorde van de te gebruiken foliën. Hieronder zal dit nader uiteen worden gezet.



Schema 1.

Op de eerste plaats worden de eigenschappen van een laminaat bepaald door de eigenschappen van de samenstellende foliën afzonderlijk, zoals b.v. lengte en breedte. Zo is de maximale lengte van elke folie afzonderlijk een beperking voor de uiteindelijke lengte van het laminaat. Ook combinaties van foliën spelen een rol, zoals bij de eigenschappen dikte en transparantie. Een laminaat kan immers alleen transparant zijn, wanneer alle opgenomen foliën transparant zijn. Een derde type eigenschap is van invloed wanneer uitsluitend naar de volgorde van de foliën gekeken wordt. Hiervan is sprake bij de eigenschappen bedrukbaarheid en chemische resistentie. Bij bedrukbaarheid van een laminaat zijn er verschillende mogelijkheden voor wat betreft de laag van het te bedrukken folie. Wanneer het folie in de buitenste laag bedrukbaar is, dan is er geen probleem. Wanneer echter het bedrukbare folie zich in de tweede laag bevindt (van buiten naar binnen geteld), dan dient het erboven gelegen folie transparant te zijn. De bedrukking zou anders niet zichtbaar zijn vanaf de buitenkant. Hetzelfde geldt

wanneer het bedrukbare folie nog verder in het laminaat is verzonken: alle bovenliggende foliën moeten in dat geval transparant zijn. Chemische resistentie is een type eigenschap met dezelfde kenmerken als de bedrukbaarheid. Wanneer een laminaat chemisch resistent voor een bepaalde stof, laten we zeggen benzeen, dient te zijn, dan moet het buitenste folie in het laminaat hieraan voldoen. Is dit folie chemisch resistent, maar permeabel voor benzeen, dan dient het volgende folie (van buiten naar binnen geteld) ook resistent te zijn, enz. Deze beperking geldt niet meer zodra een chemisch resistent folie in het laminaat wordt aangetroffen dat bovendien niet permeabel is voor het benzeen. Wanneer bedrukbaarheid en chemische resistentie samen in het eisenpakket van het laminaat zijn opgenomen speelt de volgorde bij bepaling van de optimale oplossing een rol. Wanneer slechts een van deze eigenschappen van belang is, laten we zeggen de bedrukbaarheid, dan is er geen enkele beperking voor de uiteindelijke oplossing om het bedrukbare folie in de eerste laag op te nemen. Hetzelfde geldt wanneer alleen chemische resistentie als enige volgorde-bepalende-eigenschap van belang is. Zonder de oplossing te beïnvloeden kan, in dit geval, de chemisch resistente en niet permeabele folie als buitenste laag worden opgenomen in het laminaat.

De eisen die aan het gezochte laminaat worden gesteld zijn samengevat in de volgende 9 eigenschappen:

1	Dikte
2	Breedte
3	Lengte
4	Sterkte
5	Gebruikstemperatuur
6	Transparantie
7	Bedrukbaarheid
8	Permeabiliteit
9	Chemische resistentie

Schema 2.

Samenvattend zijn genoemde eigenschappen onder te verdelen in drie categorieën:

- 1) Eigenschappen, die uitsluitend betrekking hebben op elk folie afzonderlijk in het laminaat. Dit zijn de eigenschappen breedte, lengte, treksterkte en maximale gebruikstemperatuur.
- 2) Eigenschappen die betrekking hebben op het geheel van samenstellende foliën; d.w.z. de waarden van eigenschappen van de afzonderlijke foliën dienen gesommeerd te worden. Dit zijn de eigenschappen dikte, transparantie en permeabiliteit (van

b.v. zuurstof).

- 3) Eigenschappen, die betrekking hebben op de volgorde van de foliën in het laminaat. Dit zijn de eigenschappen bedrukbaarheid en chemische resistentie.

Bovenstaande probleemstelling wordt behandeld in van Rooij, 1988.

3. HET MODEL

In het volgende wordt het geheel van doelstellingsfunctie (=kostprijs van het laminaat) en beperkingen (zie schema's) als een geheeltallig lineair programmeringsmodel geformuleerd (van Beek, 1985). Het probleem is nu het minimaliseren van de kosten van de samenstellende foliën in een laminaat, onder de voorwaarden dat het laminaat voldoet aan de daaraan gestelde eisen voor wat betreft de eigenschappen van bovengenoemde drie categorieën. We voeren de volgende notatie in:

- k: het volgnummer van een laag (van buiten naar binnen) in het laminaat.
- kmax: het maximum aantal foliën in een laminaat.
- j: het type folie.
- jmax: het totaal aantal beschikbare foliën.
- X_{jk}: een binaire variabele. X_{jk} = 0 wanneer folie j niet in laag k zit en X_{jk} = 1 wanneer folie j wel in laag k zit.
- C_j: de kosten van folie j.
- Tr: de verzameling van alle transparante foliën.
- Be: de verzameling van alle bedrukbare foliën.
- Pe: de verzameling van foliën die chemisch resistent en permeabel zijn.
- Npe: de verzameling van foliën die chemisch resistent en niet-permeabel zijn.
- Temp_j: de temperatuur waarbij folie j begint te smelten/verweken
- Tmax: de maximale gebruikstemperatuur voor het laminaat
- S_j: de treksterkte die op folie j moet worden losgelaten om de folie te doen breken.
- Smin: de minimale treksterkte die nodig is om het laminaat te kunnen produceren.
- L_j: de lengte van een rol folie van type j
- Lmin: de minimaal benodigde lengte van een rol laminaat
- D_{jk}: de dikte van folie j in laag k
- V_j: de permeabiliteitsfactor van folie j
- V: de permeabiliteitsfactor van het laminaat

De objektfunctie kan nu worden geschreven als:

$$\text{Minimaliseer } \left\{ \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} C_j * X_{jk} \right\}$$

Per laag k mag slechts één folie worden opgenomen, zodat geldt:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} X_{jk} = 1 \quad \text{voor } k = 1, 2, \dots, k_{\max}$$

Door aan de verzameling van beschikbare foliën R een "folie" NUL toe te voegen kan altijd aan deze beperking worden voldaan. Dit folie NUL komt overeen met het toevoegen van geen enkel folie. M.a.w. de eigenschappen van dit folie NUL zijn gelijk aan de eigenschappen wanneer geen enkel folie zou worden toegevoegd. (vergelijk Tabel II). Wanneer een laminaat b.v. uit maximaal 8 foliën mag bestaan, dan is een oplossing met 7 foliën plus een folie NUL een geldige oplossing.

Bovenstaande beperking is van algemene aard. De nog te bespreken beperkingen hebben betrekking op de eigenschappen afzonderlijk, en zullen hieronder worden behandeld.

Beperkingen categorie 1

De eigenschappen van categorie 1 worden gekenmerkt doordat ieder folie, dat in het laminaat aanwezig is, in dezelfde mate aan deze eigenschappen moet voldoen; b.v. wanneer een breedte van 1000 mm gewenst is voor het laminaat, dan geldt dit voor elk folie afzonderlijk. De volgende beperking kan hiervoor worden opgesteld:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} B_j * X_{jk} \geq B_{\min} \quad \text{voor } k = 1, 2, \dots, k_{\max}$$

Hier stelt B_j de breedte van folie j voor en $B_{\min}$ de minimale breedte, die men aan het laminaat stelt. De overige eigenschappen van categorie 1, lengte, gebruikstemperatuur en treksterkte, kunnen op dezelfde wijze als hierboven is gedaan voor de breedte in het model worden geformuleerd.

Beperkingen categorie 2

De eigenschappen van categorie 2 hebben betrekking op het geheel van foliën. Zo kan de dikte van een laminaat worden verkregen door de diktes van de samenstellende foliën bij elkaar op te tellen:

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} D_j * X_{jk} \leq D_{\max}$$

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} D_j * X_{jk} \geq D_{\min}$$

Hierin is D_j de dikte van folie j en $D_{\max}$ en $D_{\min}$ de maximale resp. minimale dikte, die men aan het laminaat heeft gesteld, b. v. wanneer uitsluitend een bepaald traject van diktes verwerkbaar is op een bepaalde laminatie machine.

Voor permeabiliteit geldt eenzelfde benadering. Afhankelijk van de dikte van het folie wordt een bepaalde factor berekend, welke, opgeteld bij de factoren van de overige foliën een maat is voor de permeabiliteit van het laminaat.

Om transparantie in een beperking uit te drukken wordt een binaire coëfficiënt T_j ingevoerd welke de waarde 1 krijgt wanneer het folie j transparant is en de waarde 0 wanneer het folie niet transparant is. De volgende beperking dient aan het laminaat te worden opgelegd wanneer het laminaat transparant dient te zijn:

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} T_j * X_{jk} = k_{\max}$$

Wanneer transparantie onbelangrijk is kan het "=" teken in bovenstaande vergelijking vervangen worden door het "<" teken of worden vrijgelaten. Wanneer het laminaat niet transparant dient te zijn, dan moet gelden:

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} T_j * X_{jk} \leq k_{\max} - 1$$

Beperkingen categorie 3

De eigenschappen van categorie 3 zijn minder eenvoudig in beperkingen te formuleren dan de reeds besproken categorieën. In eerste instantie kijken we naar de bedrukbaarheid van een laminaat, aangezien het principe van de beperkingen betreffende

chemische resistentie dezelfde zijn. We voeren de volgende binaire variabelen Y_k in:

$Y_k=1$ betekent: Wanneer van buiten naar binnen wordt gewerkt zit het eerst gevonden bedrukbare folie in laag k . Dus in laag 1 t/m $k-1$ zitten geen bedrukbare foliën.

$Y_k=0$ betekent: Voor alle andere gevallen.

Wanneer een bedrukbaar folie wordt bedekt door een niet transparant folie, wordt deze als niet bedrukbaar beschouwd.

Wanneer het laminaat bedrukbaar moet zijn, dan geldt:

$$\sum_{j \in B_e} X_{jk} - Y_k \geq 0 \quad \text{voor } k = 1, 2, \dots, k_{\max}$$

Deze beperking zegt dat wanneer er een laag k is, waarin zich een bedrukbaar folie bevindt ($Y_k = 1$), deze uit de verzameling B_e dient te komen ($X_{jk} = 1$).

Tevens wordt toegevoegd:

$$\sum_{j \in Tr} X_{jm} - Y_k \geq 0 \quad \text{voor } m = 1, 2, \dots, k-1$$

Wanneer er een laag k is, waarin zich een bedrukbaar folie bevindt ($Y_k = 1$) dan moeten de bovenliggende foliën (vanaf laag 1 t/m laag $k-1$) tot de verzameling der transparante foliën Tr behoren ($X_{jm} = 1$). Tenslotte wordt de volgende beperking toegevoegd:

$$\sum_{j \in B_e} X_{jm} + Y_k \leq 1 \quad \text{voor } m = 1, 2, \dots, k-1$$

Bovenstaande beperking betekent, dat wanneer er een laag k is waarvoor geldt $Y_k = 1$ dan mogen de bovenliggende lagen (laag 1 t/m laag $k-1$) geen bedrukbaar folie bevatten ($X_{jm} = 0$). Vanzelfsprekend moet er minstens een bedrukbaar folie aanwezig zijn wanneer een bedrukbaar laminaat gewenst is:

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} Y_k - 1 \geq 0$$

De beperkingen met X_{jm} gelden niet wanneer het bedrukbare folie zich in laag 1 bevindt ($k = 1$). Zoals al vermeld gaat eenzelfde type formulering op voor chemische resistentie. De beperkingen voor de drie genoemde categorieën zijn nog eens samengevat in schema 3.

Voor wat betreft de aanpak met betrekking tot de chemische resistentie voeren we binaire variabelen Z_k in ($k=1, 2, \dots, k_{\max}$)

$Z_k=1$ betekent : Wanneer van buiten naar binnen wordt gewerkt zit het eerst gevonden en niet-permeabele folie in laag k . Dus in laag 1 t/m $k-1$ dienen slechts chemisch resistente en permeabele foliën aanwezig te zijn.

$Z_k=0$ betekent : Voor alle andere gevallen.

Vanwege de analogie met de binaire variabele Y_k worden de beperkingen waarin de variabele Z_k optreedt in schema 3 terstond duidelijk.

Schema 3: Het GLP laminatie model ($k_{\max}=4$)

$$\text{Minimaliseer } \left\{ \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^{j_{\max}} C_j * X_{jk} \right\}$$

Onder de voorwaarden dat:

Algemeen:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} X_{jk} = 1 \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

Breedte:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} B_j * X_{jk} \geq B_{\min} \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

Lengte:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} L_j * X_{jk} \geq L_{\min} \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

Dikte:

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^{j_{\max}} D_j * X_{jk} \leq D_{\max}$$

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^{j_{\max}} D_j * X_{jk} \geq D_{\min}$$

Temperatuur:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} \text{Temp}_j * X_{jk} \geq T_{\max} \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

Treksterkte:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} S_j * X_{jk} \geq S_{\min} \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

Transparantie:

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^{j_{\max}} T_j * X_{jk} = 4$$

Vervolg Schema 3.

Bedrukbaarheid:

$$\sum_{j \in B_e} X_{jk} - Y_k \geq 0 \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

$$\sum_{j \in T_r} X_{jm} - Y_k \geq 0 \quad \text{voor } m = 1, 2, \dots, k-1 \text{ en } k > 1$$

$$\sum_{j \in B_e} X_{jm} + Y_k \leq 1 \quad \text{voor } m = 1, 2, \dots, k-1 \text{ en } k > 1$$

$$\sum_{k=1}^4 Y_k - 1 \geq 0$$

Permeabiliteit:

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^{j_{\max}} X_{jk} * V_j * D_{jk} > 1/V$$

Chemische
resistentie:

$$\sum_{j \in N_{pe}} X_{jk} - Z_k \geq 0 \quad \text{voor } k = 1, 2, 3, 4$$

$$\sum_{j \in P_e} X_{jm} - Z_k \geq 0 \quad \text{voor } m = 1, 2, \dots, k-1 \text{ en } k > 1$$

$$\sum_{j \in N_{pe}} X_{jm} + Z_k \leq 1 \quad \text{voor } m = 1, 2, \dots, k-1 \text{ en } k > 1$$

$$\sum_{k=1}^4 Z_k - 1 \geq 0$$

Met X_{jk} , Y_k en Z_k als binaire variabelen.

4. VEREENVOUDIGING VAN HET MODEL

Het aantal binaire variabelen kan fors oplopen wanneer het aantal foliën waaruit gekozen kan worden groot is. Er is ook gewerkt met een gerelaxeerde versie van het MILP probleem van schema 4. In die versie zijn alleen de variabelen Y_k en Z_k binair en de variabelen X_{jk} zijn vrij ($0 \leq X_{jk} \leq 1$). Het blijkt dat de aldus verkregen oplossing samenviel (in alle gevallen) met de oorspronkelijke versie. Deze gerelaxeerde formulering van het GLP probleem (schema 3) geeft aanleiding tot een snellere

oplossingstechniek vanwege het feit dat we in het gerelaxeerde model slechts met $2 \cdot k_{\max}$ binaire variabelen hebben te doen in plaats van $(j_{\max}+2) \cdot k_{\max}$ binaire variabelen.

5 RESULTATEN

Bij geringe aantallen foliën zijn er al zeer veel oplossingen mogelijk. Bij 80 beschikbare foliën en laminaten, die uit 2, 3 of 4 lagen mogen bestaan zijn er 41.478.400 mogelijke oplossingen.

Om het geheel eenvoudig te houden zijn een aantal voorbeelden in de tabellen II t/m VI weergegeven van oplossingen voor laminaten bestaande uit maximaal 4 foliën. De uitgangssituatie (Tabel I) is een verzameling R bestaande uit 6 foliën plus "folie" NUL ($j_{\max}=7$). In deze tabel zijn waarden weergegeven voor ieder van de genoemde folieën. Deze waarden benaderen gedeeltelijk de werkelijkheid. In een aantal gevallen zijn de waarden echter aangepast t.b.v. de duidelijkheid van het voorbeeld. Aan dit voorbeeld mogen dan ook geen conclusies t.a.v. de echte waarden van de genoemde folieën worden ontleend.

Tabel I : De modelgegevens.

FOLIE	DIKTE (10-6 M)	BREEDTE (MM)	LENGTE (M)	TEMPERATUUR (°C)
NUL	0	10000	100000	10000
PET	100	1700	12000	150
OPP	150	1500	1000	75
CTA	150	1400	1000	125
PES	200	250	2000	180
PEEK	250	250	2000	250
PVC	400	1400	250	70

FOLIE	TREKSTERKTE (10E6 N/M)	TRANSPARANT (JA/NEE)	BEDRUKBAAR (JA/NEE)	PRIJS (f)
NUL	10000	JA	NEE	0
PET	20	JA	JA	5
OPP	18	JA	NEE	4
CTA	20	JA	JA	7
PES	100	NEE	NEE	50
PEEK	120	NEE	NEE	125
PVC	10	NEE	JA	3

FOLIE	PERMEABILITEIT FACTOR ZUURSTOF	CHEM. BESTAND BENZEEN JA/NEE	PERMEABILITEIT BENZEEN JA/NEE
NUL	0	JA	JA
PET	1	NEE	NEE
OPP	0.15	NEE	JA
CTA	1.5	JA	JA
PES	3.6	JA	JA
PEEK	4.5	JA	NEE
PVC	0.4	NEE	JA

Het totaal aantal mogelijkheden om 4 foliën uit een verzameling van 7 foliën in een laminaat te krijgen, zonder dat enige beperkingen zijn opgelegd, is dan $7*7*7*7 = 2104$ mogelijkheden. In het laminaat dienen 4 foliën te worden gebruikt ($k_{max} = 4$), waaronder eventueel een of meerdere foliën NUL. In de tabellen II t/m IV zijn de oplossingen vermeld, die zijn gegenereerd m.b.v. het SCICONIC Lineair Programmeringspakket (de GLP optie) geïmplementeerd op de VAX-computer van de Landbouw Universiteit te Wageningen (Sciconic, 1988).

Rekenvoorbeeld A

In Tabel II staat het optimale resultaat van de uitgangssituatie zoals hiervoor is genoemd (zie schema 3). Naast de algemene restricties gelden de volgende beperkingen voor dit laminaat.

- 1) Het laminaat heeft een dikte, die ligt in het traject $450 * 10^{-6}$ m t/m $550 * 10^{-6}$ m.
- 2) Het laminaat heeft een minimale breedte van 250 mm.
- 3) Het laminaat heeft een minimale lengte van 250 m.
- 4) Het laminaat heeft een maximale gebruikstemperatuur van 75°C .
- 5) Het laminaat heeft een minimale treksterkte van $20 * 10^6$ N/m.
- 6) Het laminaat heeft een minimale permeabiliteitsfactor van 5.5
- 7) Het laminaat is niet transparant.

De beperkingen van categorie 3 zijn in dit voorbeeld nog niet verwerkt. Uit de volgende tabel blijkt dat aan alle beperkingen is voldaan en het resultaat is een 3-lagig laminaat van $f = 62, =$.

Tabel II : Oplossing rekenvoorbeeld A.

FOLIE LAAG 1	NUL	FOLIE LAAG 2	CTA
FOLIE LAAG 3	PET	FOLIE LAAG 4	PES
AANTAL LAGEN	4	DIKTE	450
BREEDTE LAAG 1	10000	BREEDTE LAAG 2	1400
BREEDTE LAAG 3	1700	BREEDTE LAAG 4	250
LENGTE LAAG 1	100000	LENGTE LAAG 2	1000
LENGTE LAAG 3	12000	LENGTE LAAG 4	2000
TEMP LAAG 1	10000	TEMP LAAG 2	125
TEMP LAAG 3	150	TEMP LAAG 4	180
STERKTE LAAG 1	10000	STERKTE LAAG 2	20
STERKTE LAAG 3	20	STERKTE LAAG 4	100
PERMEAB. FACTOR	6.1	TRANSPARANTIE	3
OBJEKTWAARDE	62		

Rekenvoorbeeld B

Het volgende voorbeeld (Tabel III) laat de uitwerking zien van het resultaat van de bedrukbaarheids formules. Stel dat een laminaat gewenst wordt dat, naast de algemene beperkingen, voldoet aan de volgende eisen.

- 1) Het laminaat heeft een minimale dikte van 400×10^{-6} m.
- 2) Het laminaat heeft een maximale gebruikstemperatuur van 75°C .
- 3) Het laminaat is transparant.
- 4) Het laminaat is bedrukbaar.

De overige eigenschappen komen in dit voorbeeld t.b.v. de duidelijkheid niet voor. De resultaten staan vermeld in Tabel III

Tabel III : Oplossing rekenvoorbeeld B.

FOLIE LAAG 1	OPP	FOLIE LAAG 2	NUL
FOLIE LAAG 3	PET	FOLIE LAAG 4	OPP
AANTAL LAGEN	4	DIKTE	400
TEMP LAAG 1	75	TEMP LAAG 2	10000
TEMP LAAG 3	150	TEMP LAAG 4	75
TRANSPARANTIE	4	Y3	1
OBJEKTWAARDE	13		

Uit dit resultaat blijkt het bedrukbare folie in laag 3 te zitten ($Y3 = 1$). De foliën in laag 1 (OPP) en laag 2 (NUL) zijn

inderdaad transparant. Het folie in laag 4 doet, voor wat de bedrukbaarheid betreft, niet meer ter zake.

Rekenvoorbeeld C

In Tabel IV staat het resultaat vermeld van een laminaat, dat, naast de algemene beperkingen voldoet aan de volgende eigenschappen.

- 1) Het laminaat heeft een minimale dikte van 500×10^{-6} m.
- 2) Het laminaat heeft een maximale gebruikstemperatuur van 70°C .
- 3) De transparantie van het laminaat doet niet ter zake.
- 4) Het laminaat is bedrukbaar.
- 5) Het laminaat is chemisch resistent tegen benzeen.

De overige eigenschappen komen in dit voorbeeld niet voor.

Tabel IV : Oplossing rekenvoorbeeld C.

FOLIE LAAG 1	CTA	FOLIE LAAG 2	NUL
FOLIE LAAG 3	PEEK	FOLIE LAAG 4	PVC
AANTAL LAGEN	4	DIKTE	800
TEMP LAAG 1	125	TEMP LAAG 2	10000
TEMP LAAG 3	250	TEMP LAAG 4	70
TRANSPARANTIE	2	Y1	1
Z3	1	OBJEKTWAARDE	135

Uit bovenstaande tabel blijkt dat het bedrukbare folie (CTA) zich in laag 1 bevindt ($Y1 = 1$) en dat de eerste 3 lagen (CTA, NUL en PEEK) chemisch resistent zijn en dat PEEK in laag 3 het eerste niet permeabele folie is ($Z3 = 1$).

CONCLUSIE

Uit bovenstaande voorbeelden blijkt, dat het volgorde probleem van foliën in een laminaat met behulp van geheeltallige lineaire programmering efficiënt oplosbaar is. Pogingen om het bovenstaande probleem m.b.v. kunstmatige intelligentie technieken op te lossen liepen stuk op het feit dat het aantal beperkingen t.o.v. het aantal oplossingen en aantal foliën erg gering was met als gevolg dat dit resulteerde in zeer grote rule-bases (voor iedere extra folie moesten extra regels worden opgenomen) met een exponentieel toenemende rekentijd bij grote problemen. Met behulp van de gerelaxeerde GLP oplossing is het mogelijk dit probleem efficiënter op te lossen.

REFERENTIES

Beek, P. van en Th. H. B. Hendriks, Optimaliseringstechnieken, principes en toepassingen 2e druk, Bohn, Scheltema en Holkema, Utrecht/Antwerpen, 1985

Rooij, C. W. D. M. van, Stageverslag ICI Holland B.V., Landbouw Universiteit Wageningen, Sectie Operationele Analyse, 1988.

SCICONIC/VM V1.40 User Guide, Scicon limited, London UK, 1988.

Ontvangen: 23-03-1990
Geaccepteerd: 27-08-1990