

## Lagers: stop de test?

Sébastien Blachère van lagerfabrikant SKF legde de Studiegroep Wiskunde met de Industrie een optimalisatievraag voor. Hij is op zoek naar de efficiëntste manier om lagers te testen. Wiskundige Martin Bootsma: “Het leek me een overzichtelijk probleem, tot we ermee aan de slag gingen.”

De Svenska Kullager Fabriken, SKF, is een grote leverancier van lagers en bijbehorende producten. Het bedrijf maakt lagers van minder dan een centimeter doorsnee, maar ook gigantische lagers voor windturbines en vliegtuigen. De grootste lager in het assortiment is 14 meter in doorsnee. Het Zweedse bedrijf heeft wereldwijd 47.000 medewerkers. In Nieuwegein staat een onderzoekscentrum van SKF.

In een grote hal in Nieuwegein staan talloze machines om de kwaliteit van de lagers te testen. Metaalmoeheid is de belangrijkste oorzaak voor het falen van een lager. “Lagers zijn net mensen. Hoe ouder ze zijn, hoe groter de kans dat ze stuk gaan”, zo vergelijkt Martin Bootsma (UU), een van de wiskundigen die met de vraag van SKF aan de slag ging. “Maar net als bij mensen, weet je van tevoren niet precies wanneer het ophoudt.”

Voor SKF een nieuw type lager op de markt brengt, doet het bedrijf kwaliteitstests om de verwachte levensduur van de lager te bepalen. Met die testen bepaalt het bedrijf de zogeheten  $L_{10}$ ; de tijd waarin 10 procent van de lagers stuk gaat.  $L_{10}$  wordt ook wel *basic life* genoemd. Het is een soort minimaal verwachte levensduur: de kans is immers 90 procent dat een lager het langer volhoudt. Daarnaast wil SKF graag de spreiding van de levensduur weten: gaan de lagers allemaal rond dezelfde tijd stuk, of varieert de levensduur aanzienlijk?

“Computersimulaties geven ons een eerste benadering van de verwachte levensduur”, vertelt Sébastien Blachère. Hij is senior onderzoeker in Nieuwegein. Hij analyseert testdata, en het is zijn taak om de beste teststrategie te bepalen. Na de computersimulaties komt het echte werk: de proef op de som komt van de testmachines. Op iedere machine worden twee identieke lagers gemonteerd.

De machines draaien de lagers rond en rond. Na verloop van tijd zal de eerste lager sneuvelen, en daarna volgen er meer.



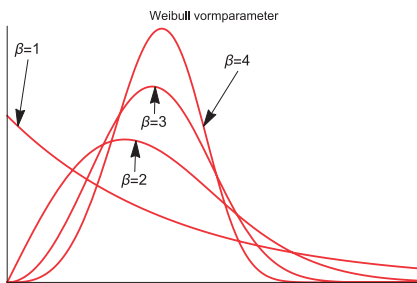
Testmachines voor lagers. Beeld: SKF

Nu gaan de lagers van SKF niet zomaar stuk. Blachère: “De testen duren al snel een paar maanden.” Het testen van de beste lagers kan zelfs wel een jaar duren. Dat maakt het testen prijzig. SKF wil de testen daarom efficiënt uitvoeren. Het bedrijf zou graag meer inzicht willen in de beste teststrategie.

Nu zijn er meerdere teststrategieën denkbaar. Zo kan een test na een vaste looptijd worden afgebroken. Een tweede strategie is om de test te stoppen, zodra een vooraf bepaald aantal lagers is versleten. Een derde strategie is een mix: de test wordt gestopt na een vaste looptijd, mits er dan een bepaald aantal lagers zijn stukgegaan. Welke strategie is de beste? En wat te doen als een lager stuk gaat? Op één machine zitten twee lagers, en die moeten ook van hetzelfde type zijn. Wanneer één lager kapot gaat, moet je dan een nieuwe monteren, zodat de ander door kan draaien? Of is het beter de machine te stoppen, zodat hij kan worden ingezet voor een andere test? SKF werkt zelf veel met simulaties, maar het zou graag meer algemeen inzicht willen in de beste ‘stopcriteria’ voor een test.

“De optimale teststrategie bepalen, dat leek me op het eerste gezicht een overzichtelijk probleem. Maar toen we aan de slag gingen, bleek het ingewikkelder dan gedacht”, zo blikt Bootsma terug. De wiskundigen begonnen natuurlijk zoals wiskundigen altijd beginnen: eerst maar eens kijken naar een versimpelde vorm van het probleem. “We dachten eerst aan drie machines met zes lagers”, vertelt Bootsma. “Maar dat bleek al behoorlijk ingewikkeld, vooral doordat er op één machine twee lagers zitten. Dus hebben we besloten om die koppeling voorlopig weg te laten. We keken eerst naar één type test op één type lager – zonder rekening te houden met het feit, dat er in werkelijkheid twee lagers per testmachine zijn.”

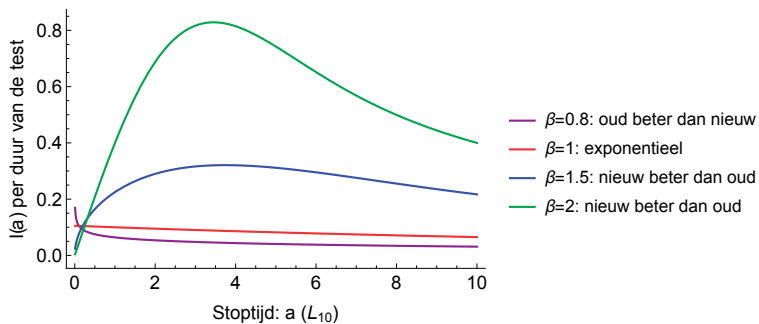
Het langer doorlopen van een test levert altijd extra informatie op – óók als er in de resterende testtijd geen lagers meer kapot gaan. “In eerste instantie denk je misschien dat alleen gesneuvelde lagers informatie geven. Maar het feit dat de lagers lang heel zijn gebleven, geeft je ook waardevolle informatie voor het bepalen van de verwachte levensduur”, zo vertelt Bootsma. SKF gebruikt voor het uitrekenen van *basic life*  $L_{10}$  de Weibullverdeling. De Weibullverdeling is een veelgebruikte manier om de levensduurverwachting van technische apparaten te modelleren. Hoe langer de testen lopen, hoe meer data er zijn om de verdeling zo nauwkeurig mogelijk vast te nagelen. “Lang laten lopen is voor het bepalen van je Weibullverdeling de beste strategie”, benadrukt Bootsma. “En als je moet kiezen, kun je beter een paar machines lang laten lopen, dan veel machines kort.”



De Weibullverdeling, model voor de levensduurverwachting van lagers, voor verschillende vormparameters beta.

Maar SKF wil natuurlijk juist zo kort mogelijk testen. Machinetijd is kostbaar, de lagers moeten de markt op, en er staan meer tests in de wacht. De kortst mogelijke testtijd, daar gaat het dus om. Om daar grip op te krijgen,

introduceerden de wiskundigen de Fisherinformatie. Fisherinformatie is een veelgebruikte methode in de statistiek om de hoeveelheid informatie te kwantificeren, die een test oplevert. “Eerst hebben we de Fisherinformatie bepaald voor verschillende typen tests. Je kan dan de extra informatie uitrekenen die het oplevert om de test niet na drie, maar na vier kapotte lagers te stoppen.” Om vervolgens de optimale stoptijd te kunnen berekenen, introduceerde de groep een nieuwe eenheid. De Fischerinformatie werd gedeeld door de looptijd. Bootsma: “Zo krijg je de hoeveelheid informatie die een test je gemiddeld per minuut oplevert.” Voor tests met een vooraf vastgestelde stoptijd loopt de informatie per tijdseenheid snel op tot ongeveer vier keer  $L_{10}$ . Iedere minuut die de test doorloopt, levert dus meer informatie op dan de minuut ervoor. Na vier keer  $L_{10}$  vlak dat af of daalt de informatie per minuut zelfs. De grafieken geven SKF houvast bij het bepalen van de optimale testtijd: het geeft een waarde aan het langer door laten lopen, die SKF vervolgens kan afwegen tegen de kosten. Blachère: “Met dit resultaat ben ik heel blij. Zo hadden wij het probleem nog niet benaderd.”



### De Fisherinformatie voor een test met een vaste looptijd.

Behalve tests met een vaste looptijd, en tests die stoppen na een vast aantal kapotte lagers, doet SKF ook gemengde testen. Dat zijn de tests die na een vooraf vastgestelde tijd stoppen, mits er dan voldoende lagers gesneuveld zijn. Zijn er op de stoptijd nog te weinig lagers kapot, dan loopt de test door tot dat aantal wel is gehaald. “Het is moeilijk om analytisch de Fisherinformatie voor zo’n gemengde test uit te rekenen”, vertelt Bootsma. “Dat was dan ook het punt dat we begonnen zijn met Monte Carlo-simulaties.” Na de gezamenlijke start op dinsdag deelde de groep zich de rest van de week in tweeën: er stonden mensen voor het bord

na te denken over de grote ideeën en er zaten mensen achter de computer code te schrijven. “We zijn begonnen aan het schrijven van code voor verschillende stopcriteria. Die code zou het ook makkelijker moeten maken om complexe situaties uit te rekenen, bijvoorbeeld de beste strategie als je meerdere tests in de wachtrij hebt.”

Die simulaties waren nog niet af aan het eind van de week. “Ze kosten behoorlijk wat rekenkracht. We lieten de simulaties ’s nachts lopen, maar helaas hadden we maar twee nachten”, lacht Bootsma. De resultaten van de simulaties, die hij op vrijdag presenteerde, waren nog niet optimaal. “We hadden allemaal het gevoel dat dit met weinig extra werk beter moest kunnen, dus daar heeft een aantal mensen na de studiegroep nog wat verder aan gesleuteld. SKF zou daar een afstudeerproject van kunnen maken.”

Een ander idee van de wiskundigen is om in simulaties soms van de Weibullfunctie af te stappen. Bootsma: “De vorm van de Weibull wordt bepaald door de vormfactor,  $\beta$ . Dat is een maat voor de spreiding waarmee de lagers kapot gaan. Wanneer  $\beta$  groot is, piekt de Weibullverdeling heel sterk rond één waarde. Alle lagers gaan dan ongeveer tegelijkertijd stuk. Maar als  $\beta$  in de buurt van 1 zit, lijkt de Weibull sterk op een exponentieel afvallende functie. En omdat je daarmee makkelijker kan rekenen, adviseren we om de Weibullverdeling voor  $\beta$  in de buurt van 1 te benaderen met een exponentiële functie.” De studiegroep heeft dit idee niet meer uit kunnen werken, maar geeft Blachère dit idee als suggestie mee. Die zegt er zeker naar te gaan kijken.

Blachère was zelf de hele week in Utrecht aanwezig. Bootsma: “Dat was prettig. Het voorkomt dat we gingen rekenen aan dingen, die SKF niet interessant vindt. Wij hadden bijvoorbeeld een teststrategie bedacht, waarbij je tijdens de test lagers verplaatst. Als er twee lagers kapot zijn gegaan, zet je de overgebleven twee lagers samen op één machine. Maar Sébastien vertelde ons meteen dat je lagers tijdens een test niet opnieuw mag monteren, omdat de montage een grote factor is in de testresultaten.” Blachère zelf vond het een groot voordeel om met experts over zijn vraag te kunnen praten. “De wiskundigen in de groep hadden een brede kennis over statistische methoden. Ik heb er mensen ontmoet, met wie ik in de toekomst graag samen wil werken.”