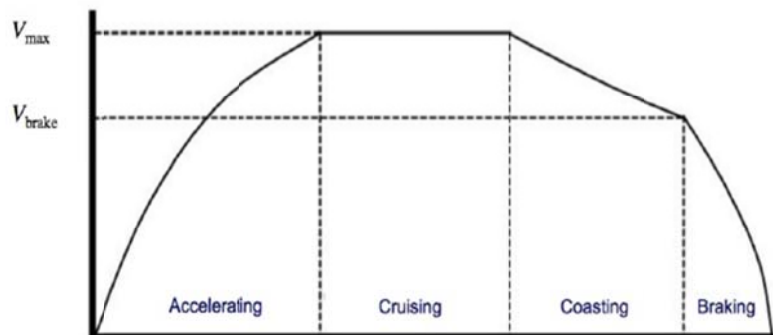


Zuiniger treinen door een aangepaste dienstregeling

Hoe gelijkmatiger een trein rijdt, hoe zuiniger. Maar de overvolle Nederlandse dienstregeling vergt vaak maximaal optrekken en remmen. De wiskundigen vonden toch nog mogelijkheden tot energiebesparing tussen deze smalle marges. Gabor Maroti van NS: 'Fascinerend, wat een verscheidenheid aan ideeën uit deze groep komt.'

Wie op de website van de NS zijn treinreis vergelijkt met de overeenkomstige autorit, ziet dat hij minstens 75 % CO₂-uitstoot bespaart (of 95%, als die trein geacht wordt op groene stroom te rijden). Met gemiddeld 1,1 miljoen passagiersritten per dag tikt dat lekker aan. Niettemin zou de NS graag nog meer energie besparen, door treinen zuiniger te laten rijden.

De gezamenlijke treinen in Nederland consumeren nu gemiddeld ongeveer 300 megawatt, de productie van een middelgrote elektriciteitscentrale. Maar dat is het gemiddelde; er zijn grote pieken tijdens de ochtend- en avond-spits, en een lange, diepe dip tijdens de nacht.



Gabor Maroti, onderzoeker bij de NS-afdeling Process Innovation, liet bij de presentatie op maandagochtend zien dat voor één rit, onder ideale omstandigheden, de optimaal zuinige oplossing al gevonden is. Die bestaat achtereenvolgens uit: maximaal accelereren tot de hoogst toegestane snelheid (*accelerating*), deze snelheid vasthouden (*cruising*), de trein uit laten rollen tot de snelheid waarop de machinist moet beginnen met remmen (*coasting*), en remmen (*braking*). De meeste energie wordt verbruikt tijdens *accelerating* en de rest tijdens *cruising*, terwijl *coasting* en remmen uiteraard geen energie kosten.

Een interessante nieuwe ontwikkeling zal deze week trouwens buiten beschouwing blijven: sommige moderne treintypen kunnen energie terugwinnen bij het afremmen, omdat de remmen als generatoren werken en stroom opwekken. Maroti verwacht echter, dat het nog

jaren zal duren eer deze optie in Nederland een substantiële bijdrage gaat leveren. Hoewel het optimale snelheidsprofiel voor één vrije rit dus al bekend is, ligt dit voor meerdere ritten een stuk ingewikkelder. Zo moet een trein onderweg vaak op een voorgeschreven tijd een bepaald punt gepasseerd zijn, bijvoorbeeld omdat het traject enkelspoor is en er een andere trein achteraan komt. NS (en ProRail) noemen dit 'dienstregelpunten'. Dat kan een aansluiting zijn, een inhaalspoor, een brug, een goederen-enplacement, of nog iets anders. De werkgroep noemt deze dienstregelpunten deze week hubs.

Dit is niet hetzelfde als een extra stop, omdat een hub met een, binnen bepaalde grenzen, willekeurige snelheid gepasseerd mag worden. Ritten beïnvloeden elkaar dus, en dan is het veel moeilijker om een optimale oplossing te vinden. Daarom werden de wiskundigen uitgenodigd, om alle aspecten van de NS-dienstregeling te bekijken en met suggesties voor verbeteringen te komen.

En dan is er nog de weerbarstige praktijk van alledag. Maroti: 'Sommige machinisten zijn niet zo erg geïnteresseerd in zuinig met energie omgaan. Anderen maken er juist een sport van om zo zuinig mogelijk te rijden. Maar dat telt allemaal natuurlijk niet meer als een trein vertraging heeft, en de machinist nog op tijd bij het volgende station probeert te komen.'

Ruwe schattingen

Bij de eerste bespreking heeft de groep geen moeite om het door de NS voorgeschotelde probleem in een wiskundige vorm te gieten. Voor het energieverbruik van een trein levert de natuurkunde relatief simpele formules aan, waarmee in principe goed te rekenen valt. Het energieverbruik bestaat uit twee delen: de meeste energie is nodig om de trein te versnellen vanuit stilstand, of vanuit een lage naar een hogere snelheid (*accelerating*). Daarnaast moet de wrijving die de trein ondervindt door lucht- en rol-weerstand overwonnen worden, zowel tijdens *accelerating* als tijdens *cruising*, wanneer de snelheid constant is.

De energie benodigd voor het versnellen is afhankelijk van de massa van de trein, en de formule voor de wrijvingskracht bevat een paar constantes, getallen die afhangen van het type trein (en hoeveel wagons die heeft, en of die vol zitten, bijvoorbeeld). Hoewel Gabor Maroti toezegt een aantal gegevens op te zullen zoeken, zal dat het probleem niet zijn: 'Wat betreft die constantes gaat het om ruwe schattingen. Maar als er treinen uit de berekening rollen die sneller gaan dan het licht, moet je misschien toch je constantes aanpassen.'

De groep besluit al snel om het probleem – en zichzelf - in tweeën te splitsen: een subgroep gaat werken aan een optimaal snelheidsprofiel van één rit, de andere subgroep gaat proberen de dienstregeling als geheel energiezuiniger te maken. Omdat de NS dienstregeling op één dag bestaat uit ongeveer tienduizend getimed 'gebeurtenissen' (vertrek, aankomst, passeren van een wissel, etc.) zal je hier zonder computerondersteuning niet ver komen. Guus Regts, van de Universiteit van Amsterdam: 'Zijn jullie een beetje handig met computers?' Uit zijn subgroep komen opmerkingen als 'Niet echt', maar dat is hopelijk valse bescheidenheid.

Ook per subgroep heeft het probleem nog meerdere aspecten, die vast niet allemaal in een week aan bod kunnen komen. Maroti: 'We komen hier met een heleboel vragen, aarzel niet om de meeste te laten vallen. We konden niet voorspellen welke voor jullie interessant zouden zijn.'

Van Schiphol naar Enschede

De eerste subgroep besluit om één traject, een intercity-trein van Schiphol met als eindbestemming Enschede, tot in détail door te rekenen op basis van werkelijke gegevens. Om

het energieverbruik van de trein te berekenen, moet je op elk moment zijn snelheid weten. Zo'n snelheidsprofiel zal een zeer hobbelige grafiek zijn, want de trein moet uiteraard stoppen bij tussenliggende stations, en heeft dan snelheid nul, terwijl tussen stations meestal ergens de maximale snelheid bereikt wordt.

In theorie zijn er oneindig veel snelheidsprofielen mogelijk, omdat de machinist elke fractie van een seconde de optie heeft om wel of niet te accelereren of te remmen.

Maar om er aan te kunnen rekenen, wordt de zaak drastisch vereenvoudigd: tussen elke twee stations wordt de snelheidscurve in de grafiek opgedeeld in een aantal rechte stukken. Een computer kan met veel rekenwerk bepalen, welke van die 'stuksgewijs lineaire' snelheidsprofielen het minste energie kost, en dat minimum zal heel dicht bij het ideale minimum – zonder die beperkingen - liggen.

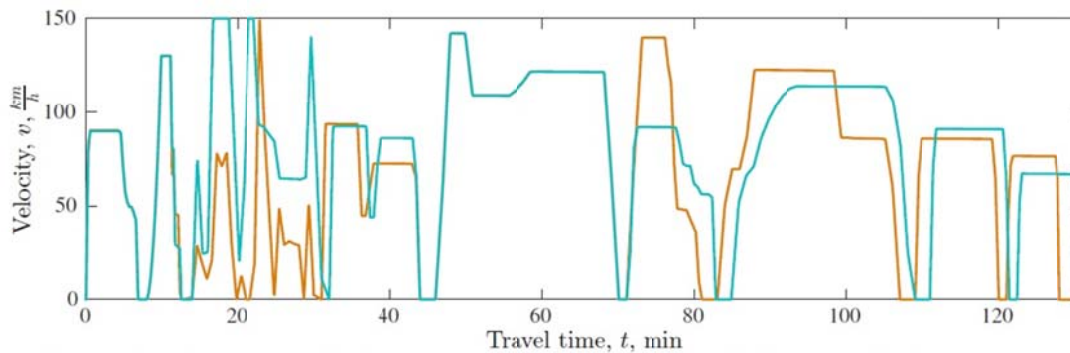
Als je alle aankomst- en vertrektijden en alle hubs als gegeven beschouwt, vind je daarvoor een snelheidsprofiel met minimale energie over het hele traject Schiphol-Enschede.

Dit ideale profiel zal weinig afwijken van wat in de praktijk nu al gereden wordt. Dit komt ook, omdat de Nederlandse treindienstregeling heel strak in elkaar zit. Michael Muskulus, van de universiteit Leiden: 'Ze gaven ons een dienstregeling waar je je bijna niet aan kunt houden. Op veel segmenten is die zo strak, dat de machinist alleen maar maximaal kan accelereren en remmen om op tijd bij de volgende hub of het volgende station te komen.'

Dat roept de vraag op: waar valt nog winst te behalen? De volgende dag is volgens Guus de Regt wel duidelijk welke kant het op gaat: 'Wat vooral gaat gebeuren, is schuiven met de hubs.' Tijdens de presentatie op vrijdag komt de groep met cijfers: als er helemaal geen hubs waren, alleen stops op stations, zouden treinen wel 50% zuiniger kunnen rijden. Hubs zijn op een druk spoornetwerk weliswaar onvermijdelijk, maar door op een traject subtiel in de tijd te schuiven met de hubs, kun je 5% energie besparen als de totale reistijd hetzelfde moet blijven. Mag de reistijd langer worden, dan kun je tot 30% energie besparen.

Dit geldt, als je één traject bekijkt. Maar het verschuiven van een hub op het intercity-traject Schiphol-Enschede zal consequenties hebben voor hubs op andere trajecten, bijvoorbeeld voor de stoptreinen die ook van het spoor tussen Schiphol en Enschede gebruik maken. Uiteraard spreekt het niet vanzelf, dat het verschuiven van deze hubs voor die stoptreinen ook een zuiniger snelheidsprofiel oplevert.

De Regt: 'Als je op één traject iets kunt verbeteren, betekent dat in principe, dat je ook in het hele treinennetwerk dingen kunt verbeteren. Maar dan moet je alle hubs in de dienstregeling tegelijk en in samenhang verschuiven.'



[bijscript] Optimaal snelheidsprofiel (blauw) voor het traject Schiphol-Enschede, rekening houdend met hubs, punten tussen stations die op een bepaalde tijd gepasseerd moeten zijn. Zonder hubs is het optimale

snelheidsprofiel oranje (dit valt deels samen met het blauwe profiel). Door een beetje te schuiven met de *hubs*, is bij gelijke reistijd een energiebesparing van 5 % mogelijk. Als de reistijd langer mag, is een besparing van 30% mogelijk.

Schuiven met hubs

Het optimaliseren van de dienstregeling als geheel was het onderwerp voor de tweede subgroep. Als je alle aankomst-, vertrek-, en hubtijden als gegeven beschouwt, kan een computer met de methode van de eerste subgroep in dertig seconden een optimaal snelheidsprofiel voor één traject berekenen. Voor het Nederlandse spoorwegnet als geheel duurt dat twee uur.

Dat is echter geen optimaal energiezuinige oplossing, omdat al op het traject Schiphol-Enschede was gebleken, dat je de meeste winst juist kunt behalen door te schuiven met de hubs (en eventueel met de aankomsttijden bij tussenliggende stations). Maar als je in de hele dienstregeling met hubs gaat schuiven, wordt het aantal mogelijkheden gigantisch groot. En iedere keer als je een nieuwe indeling probeert, moet je voor alle trajecten opnieuw een optimaal snelheidsprofiel zoeken, en vervolgens kijken of die allemaal samen een energiezuiniger dienstregeling opleveren.

Bij de eindpresentatie presenteerde de groep al een aanzet om het zoeken naar een optimaal snelheidsprofiel te versnellen, de *quick heuristic* (zoiets als 'vlotte vuistregel'), waarbij maar een heel beperkt aantal mogelijke combinaties van accelereren, *cruisen* en *coasten* wordt onderzocht.

Majid Salmani, van oppert tijdens de presentatie mondeling nog een idee: 'Een systeem dat real time controleert hoe energiezuinig er gereden wordt, en de machinist adviseert.' Maar dit systeem moet wel alles in samenhang bekijken. Bij nader inzien is dat nu nog niet haalbaar: 'Als ergens een trein vertraging oploopt, moet je nu twee uur rekenen om de hele dienstregeling bij te stellen.'

Gabor Maroti van NS kon het wel waarderen: 'Het is fascinerend om te zien, wat een verscheidenheid aan ideeën uit deze groep komt.'

Een belangrijke conclusie van de groep was, dat er een veel snellere 'optimale energie-vinder' nodig is. Wat je eigenlijk wilt, is één formule voor een optimaal snelheidsprofiel, waar je slechts de aankomst- vertrek- en hub-tijden in hoeft te voeren, zodat de computer vrijwel onmiddellijk een antwoord geeft. Wiskundigen spreken dan van een 'analytische oplossing', in tegenstelling tot de bovenbeschreven 'numerieke oplossing', die een computer twee uur kost om een nieuwe indeling door te rekenen. Dat is wellicht een geschikte uitdaging voor een volgende Studiegroep Wiskunde met de Industrie.