

Het leven in 2,5D bestaat uit driehoeksverhoudingen

Het klinkt ingewikkeld - en dat is het ook: als (terrein)hoogtemodellen en gewone, tweedimensionale objecten worden geïntegreerd, ontstaan 2,5D objecten. Er is evenwel een groot scala aan toepassingen mogelijk, waarvoor men anders zijn heil zou moeten zoeken in het nóg complexere 3D. 2,5D GIS is vaak een hele efficiënte oplossing en de experts zijn gelukkig al in het stadium van verbetering van de praktische toepasbaarheid. Een introductie voor 'leken'.

De meeste geobestanden beschrijven objecten uit de werkelijkheid door gebruik te maken van punten, lijnen en vlakken, dus in twee dimensies (2D). Dit geldt bijvoorbeeld voor de huidige topografische producten in Nederland en kadastrale registraties over de gehele wereld. Maar naast 'normaal', 2D GIS, komt 3D GIS langzamerhand dichterbij. Men spreekt van (volledig) 3D als er ook volume-primitieven bij het modelleren worden gebruikt (buiten de scope van dit artikel). Volledig 3D modelleren is momenteel nog erg complex en de bijbehorende inwinning vraagt bovendien veel tijd. Voor veel 3D-achtige toepassingen bieden echter 2,5D bestanden al voldoende mogelijkheden. Een voorwaarde daarvoor is de beschikbaarheid van hoogtemodellen van het terrein. Voor effectieve toepassingen is de crux, dat de 2D objectbestanden op de juiste wijze worden geïntegreerd.



Figuur 1b. Op basis van het AHN berekend Triangulated Irregular Network (TIN).

Inmiddels is zowel in Nederland als in Vlaanderen een gebiedsdekkend hoogtebestand beschikbaar. In Nederland wordt dit AHN-bestand met behulp van laseraltimetrie ingewonnen, met een punt dichtheid van één punt per 16 m². Het AHN kan worden beschouwd als een 2,5D bestand, waarbij op elke x,y-locatie één z-waarde beschikbaar is. Hierdoor 'golft' er een oppervlak door de 3D ruimte (zie figuur 1b). Dat is wat 2,5 dimensionaal wordt genoemd.

Toepassingen

De toepassingsmogelijkheden van 2,5D geïntegreerde geo-bestanden zijn talrijk. Voor de werkzaamheden van Rijkswaterstaat en waterschappen kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de combinatie van het AHN met de bodemsoortenkaart voor verdrogingsbestrijding en maaiveld daling. De integratie van het AHN met de kadastrale registratie kan zeer bruikbaar zijn om rechthebbenden van grote infrastructuur objecten te bepalen, bijvoorbeeld bij tracéstudies (waarbij reliëf en eigendomssituatie beide van belang zijn bij het plannen). In een mogelijk (deels) 3D kadaster kunnen kadastrale percelen worden beschreven door middel van 2,5D oppervlakten.

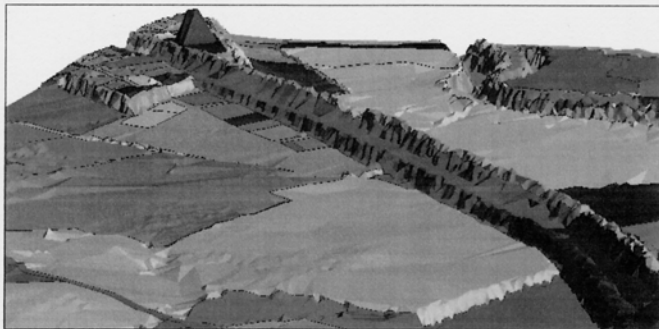
Integratie van topografische bestanden met hoogtebestanden kan ook andere werkprocessen vereenvoudigen, bijvoorbeeld zichtbaarheids- en geluidsstudies

in het kader van milieueffectrapportages of als ondergrond bij het beheer van gegevens over verharding, bermen en kunstwerken. Naast deze analysemogelijkheden biedt de integratie van 2D objectgegevens met het 2,5D reliëf nog vele andere mogelijkheden voor analyses en visualisaties, denk bijvoorbeeld aan het simuleren van overstromingen.

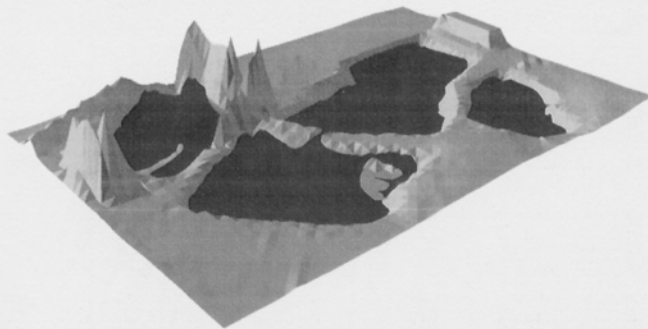
De integratie van het 2,5D reliëf met topografische producten, zoals de TOP10NL, kan zowel voor de Topografische Dienst Kadaster als voor zijn klanten zeer nuttig zijn. Intern zou de Topografische Dienst Kadaster de 2,5D TOP10 bijvoorbeeld kunnen gebruiken voor het afleiden van hoogtelijnen en duinschaduwingen voor het (analoge) 2D kaartmateriaal. Ook taluds langs wegen en spoorlijnen kunnen automatisch herkend worden en vertaald in 'schrabjes' voor op de kaart. In digitale toepassingen zouden deze cartografische



Figuur 1a. Punten uit Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), ingekleurd op basis van hun hoogte.



Figuur 2: Constrained TIN, waarbij kadastrale percelen als 2,5D objecten (een verzameling van 2,5D driehoeken) staan opgeslagen in de TIN-datastructuur.



Figuur 3. Niet-vlak meer door integratie zonder aandacht voor semantiek (Koch, A. en C. Heipke, *Semantically correct 2.5D GIS data: the integration of a DTM and Topographic vector data*, In *Proceedings 11th International Symposium on Spatial Data Handling*, Leicester, UK, Augustus 2004).

representaties niet nodig zijn, omdat het mogelijk is om binnen een software-omgeving het model in 2,5D te visualiseren. Hierdoor zijn dijken en taluds direct zichtbaar en hoeft geen gebruik gemaakt te worden van bepaalde symbolen. Schaduwing wordt in dergelijke softwareomgevingen vaak on-the-fly gegenereerd, waarbij instellingen als richting en hoogte van de zon gevarieerd kunnen worden.

Natuurlijk beperkt de integratie zich niet tot topografische bestanden van de Topografische Dienst, maar ook integratie met de (toekomstige object- of vlak-) GBKN is mogelijk. Een nuttige toepassing van een dergelijk bestand ligt in het beheer van wegen, waarbij de helling van de weg direct bekend is en niet meer afzonderlijk toegevoegd hoeft te worden.

Voor 2,5D geodata geldt niet alleen dat de mogelijke toepassingen heel breed zijn, ook het schaalniveau waarop deze data wordt gebruikt, kan variëren. Door het gebruik van het AHN zou men wel-

licht denken dat de toepassingen alleen grootschalig zijn, maar in een gegeneraliseerde vorm zou de 2,5D topografische data bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden in autonavigatiesystemen voor het populaire birds-eye standpunt. Als de interface zou aangeven of er op een dijk of op een weg door een dal wordt gereden, dan vereenvoudigt dit de interpretatie van de kaart. De detaillering in een dergelijk beeld is heel laag, omdat in de meeste mobiele navigatieoplossingen, zoals PDA's, maar zeer beperkte beeldschermresolutie beschikbaar is.

Gebruikte datastructuur

Op basis van de punten uit bijvoorbeeld het AHN kan een Digitaal Hoogte Model (DHM) worden vervaardigd. Een veel gebruikte techniek voor de oppervlakrepresentatie is een TIN (*Triangulated Irregular Network*), oftewel een oppervlak opgebouwd uit onregelmatige driehoeken. In figuur 1a is een verzameling AHN punten weergegeven, ingekleurd op basis van

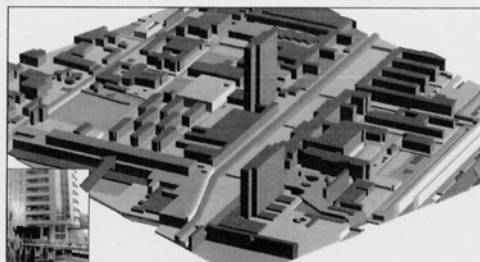
hun hoogte. Figuur 1b toont het op basis van deze punten berekende TIN. Dit TIN is een oppervlak, dat de vorm van het aardoppervlak goed representeert.

Een groot pluspunt van een TIN is dat het mogelijk is om gebieden met veel reliëf met veel punten (en dus veel driehoekjes) te beschrijven, terwijl voor vrijwel vlakke gebieden volstaan kan worden met weinig punten (en dus grote driehoeken). Hiermee wordt opslag van data, die niets toevoegt aan de vorm van het terrein, vermeden.

Een ander sterk punt van een TIN is dat deze datastructuur zeer helder gedefinieerd is: een lijn is gedefinieerd met twee punten, en een driehoek met drie punten of lijnen. Een edge (lijn) grenst hierdoor altijd aan twee driehoeken en een driehoek heeft altijd drie buurdriehoeken. Deze voorkennis maakt veel geometrische bewerkingen en analyses eenvoudiger (zo is een driehoek convex, wat point-in-polygon testen vereenvoudigt).

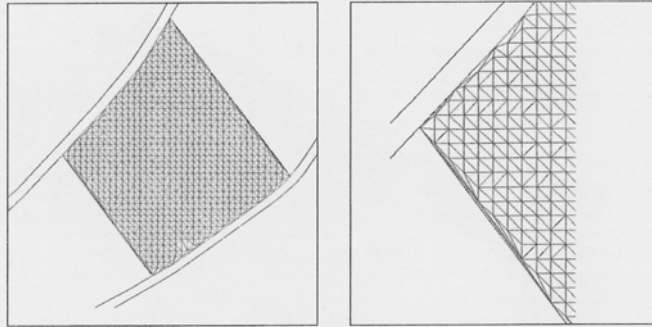
Er bestaan meer methoden om triangulaties (driehoeknetwerken) op te bouwen, maar de Delaunay triangulatie is de bekendste. Deze methode bouwt op basis van een puntenverzameling een triangulatie, waarbij de kleinste hoek voor alle driehoeken wordt gemaximaliseerd. Dit leidt ertoe, dat driehoeken zo gelijkvormig mogelijk zijn. De twee voordelen hiervan zijn dat dicht bij elkaar liggende punten met elkaar verbonden worden en dat dunne driehoeken met een kleine inwendige hoek (die numerieke problemen kunnen veroorzaken) voorkomen worden.

Om 2D objecten in de triangulatie op te kunnen slaan, is het een vereiste dat de edges die deze objecten begrenzen, ook daadwerkelijk in de triangulatie voorkomen, wat niet het geval is bij de gewone Delaunay triangulatie. Uiteindelijk zijn de 2D objecten, na toepassing van een aangepast Delaunay-algoritme, exact

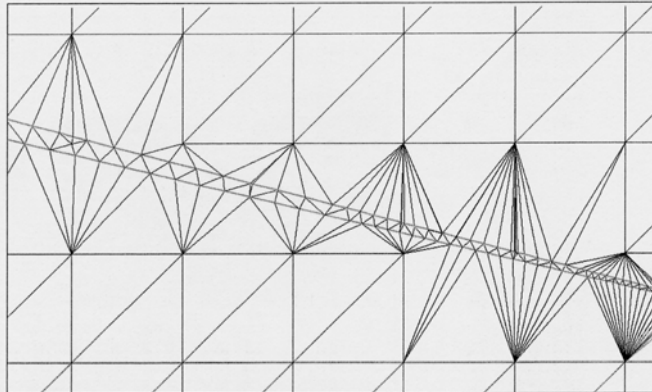


Figuur 4. Een enkele hoogte koppelen aan topografische vlakken op basis van AHN en 2D objecten (van oudere datum, waarin gebouw in waterobject).

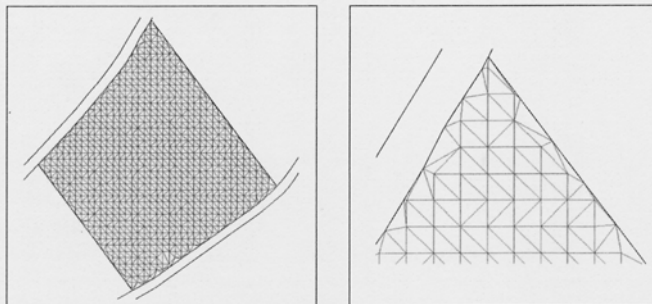
Figuur 5. Een perceeloppervlakte (surface) in een constrained TIN (links), gebaseerd op integratie van perceelsgrenzen en het AHN; rechts is een detail uitvergroet.



Figuur 6. Een conforming TIN resulteert in erg veel kleine driehoeken bij twee bijna parallel gelegen perceelsgrenzen of wanneer hoogtepunten vlak bij de perceelsgrenzen liggen.



Figuur 7. Een perceeloppervlakte in een constrained TIN, waarbij voorafgaand aan de triangulatie extra punten zijn toegevoegd op de perceelsgrenzen.



beschreven door een verzameling driehoeken: de edges van driehoeken bevatten de edges van de objecten (zie figuur 2). Dit is mogelijk door de edges van deze objecten als voorwaarde (constraint) in het algoritme in te voegen. Dergelijke triangulaties worden *constrained triangulations* genoemd.

Integratieproblemen

Hoewel door de integratie van een hoogtebestand met een 2D topografisch

of kadastraal bestand 2,5D objecten kunnen worden gegenereerd, kunnen zich bij deze integratie een aantal problemen voordoen.

a. Geometrische en semantische verschillen

Zo kunnen er geometrische verschillen zitten tussen beide bestanden, waardoor semantisch gezien het resultaat niet klopt. In figuur 3 is hiervan een voorbeeld gegeven. Een hoogtemodel is hier geïntegreerd met een aantal meren. Van het

wateroppervlak zou je verwachten dat het vlak is, maar doordat de begrenzing in het 2D bestand niet overeenkomt met de grenzen van het vlakke deel in het digitaal hoogtemodel, loopt het meer aan de zijkanalen omhoog.

Om deze problemen te voorkomen kunnen in het algoritme aanvullende voorwaarden worden gesteld aan bepaalde typen objecten: sportvelden, havens, kanalen en rivieren moeten worden gerepresenteerd door een horizontaal vlak. Ook voor niet-horizontale objecten kunnen voorwaarden worden gedefinieerd; zo zijn voor wegen en spoorlijnen maximale hellingen te geven. Bij het overtreden van dergelijke regels zal het afhangen van de feitelijke situatie welke oplossing gekozen moet worden; bijvoorbeeld 2D objecten aanpassen aan het hoogtemodel (of het omgekeerde, afhankelijk van de kwaliteit van de gebruikte brongegevens). Het resultaat moet in ieder geval een logisch, consistent geheel zijn.

Een ander probleem wordt veroorzaakt doordat de inwindatum van het hoogtemodel niet overeen zal komen met de inwindatum van de 2D objecten, met inconsistentie als gevolg. In figuur 4 is een model te zien, dat vervaardigd is met behulp van 3D Analyst in ArcView. Het model is gebaseerd op de topografische kaart 1:10.000 en het AHN. Aan elk vlak is een enkele hoogtewaarde gekoppeld. Links op de voorgrond is een blauw object (water) te zien, dat duidelijk hoger ligt dan de omliggende objecten. Dit is te verklaren door het verschil in inwindatum. Tegenwoordig staan er twee flats in het water, die al wel in het hoogtemodel voorkwamen, maar nog niet in de topografische data. Tijdens de vervaardiging van dit model is gekeken welke hoogtepunten allemaal binnen het vlak 'water' vallen en daarvan is het gemiddelde bepaald. Doordat de hoogtepunten binnen het watervlak al wel de gebouwhoogte bevatten, is deze gemiddelde waarde veel hoger dan de correcte waterhoogte.

b. Geometrische problemen bij een constrained triangulatie

De geometrische problemen die zich voordoen bij een constrained triangulatie (het berekenen van het netwerk van driehoeken onder nader gestelde voorwaarden) zijn te illustreren aan de hand van de integratie van het AHN met kadastrale percelen. De expliciete definitie van

perceelsgrenzen als constraints in het TIN, veroorzaakt uitgerekte driehoeken vlak bij de perceelsgrenzen. Dit is vooral het geval wanneer de perceelsgrenzen relatief lang zijn ten opzichte van de afstand tussen buurpunten in het AHN: wanneer een AHN coördinaat dichtbij het midden van een perceelgrens ligt, wordt er een platte driehoek gevormd bij het verbinden van het AHN punt met de twee eindpunten van de perceelsgrens. Dergelijke platte driehoeken zijn numeriek erg onstabiel en bovendien visueel zeer onaantrekkelijk.

Een ander probleem van deze constrained TIN's is, dat de perceelsgrenzen een rechte lijn worden op het 2,5D oppervlak, omdat er geen punten worden toegevoegd op de perceelsgrenzen. Hierdoor kan er geen hoogtevariatie op de (rechte segmenten van) perceelsgrenzen beschreven worden (zie figuur 5).

De oplossing hiervoor is het toevoegen van (zogenaaamde 'Steiner')-punten. Op elke lijn (edge) die begrensd wordt door een driehoek die niet voldoet aan het Delaunay-criterium, worden extra punten geplaatst. Vervolgens worden lokaal nieuwe driehoeken gevormd. Deze opdeling wordt net zo lang gedaan, totdat alle driehoeken in het TIN voldoen aan het Delaunay-criterium. Dit wordt een *conforming TIN* genoemd.

Maar ook deze triangulatie levert problemen op. Wanneer twee perceelsgrenzen vlakbij elkaar liggen of wanneer hoogtepunten erg dicht bij perceelsgrenzen liggen, worden veel kleine driehoeken gegenereerd (zie figuur 6). Deze kleine driehoeken hebben totaal geen nut, omdat ze geen variatie in de hoogte representeren en ook geen extra object-

informatie toevoegen.

Ook hier is weer een oplossing voor: verdeel de perceelsgrenzen, voorafgaand aan de triangulatie, in edges met een lengte van maximaal twee of drie keer de gemiddelde afstand tussen naburige terreinhoogtepunten. Figuur 7 toont dit 'refined constrained' TIN voor het test-perceel; de perceelsgrenzen zijn hierbij verdeeld in lengtes van maximaal tien meter. Hierdoor wordt het TIN aanzienlijk verbeterd (te platte en te veel kleine driehoeken worden vermeden), terwijl door toevoeging van de extra punten op de perceelsgrenzen meer hoogtevariatie kan worden aangebracht op de originele (rechte) perceelsgrenzen zelf.

c. Te veel punten

Tijdens het genereren van de TIN's in dit onderzoek werd al snel duidelijk dat de bestanden enorm groot werden (44.000 punten voor een gebied van 1450 bij 800 meter), terwijl niet alle punten nodig zijn om het hoogteoppervlak goed te kunnen representeren. Daarom is ook onderzocht hoe het bestand kleiner kan worden gemaakt (en dus beter bewerkbaar) door overbodige punten te verwijderen (generaliseren). De generalisatie (filtering) van terreinhoogtepunten is toegepast, voordat de integratie plaatsvond.

In het daarvoor ontwikkelde algoritme worden alleen de karakteristieke punten behouden. Een punt is karakteristiek als de helling van de twee aangrenzende driehoeken niet significant verschillend is. Nadat alle niet-significante punten zijn verwijderd, wordt voor alle verwijderde punten gekeken of het hoogteverschil tussen het verwijderde punt en het nieuw

Toepassingen van 2,5 D GIS

De oorspronkelijke lijst met voorbeelden is ruim twee maal zo lang. Bron: Bsk RGI voorstel '3D topografie', oktober 2004

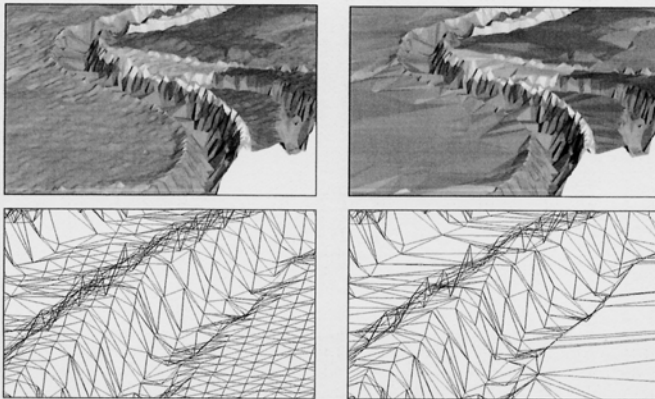
- Analyse ten behoeve van natuurontwikkelingsprojecten
- Tracéstudies
- Planning van grote infrastructurele werken
- Analyse i.h.k.v. zichtbaarheids- en geluidsstudies, bijvoorbeeld voor milieueffectrapportages (MER)
- Bepaling grondverzet, ook bij doorrekenen tracékeuzes
- Geomorfologie
- Als ondergrond voor de database met beheersinformatie op het gebied van verharding, bermen, kunstwerken, openbare verlichting, wegmeubilair
- Oppervlakte- en volumeberekeningen
- Peilbesluiten
- Verdrogingsbestrijding
- Maaiveldaling
- Ruwheidsbepaling uiterwaarden in verband met waterafvoercapaciteit
- Langs- en dwarsprofielen van waterkeringen
- Opsporen van gebieden met mogelijk archeologische waarden
- Opslaan en visualiseren van de hoogte van gebouwen en obstakels.
- Modelleren van bruggen, viaducten, tunnels en gebouwen gelegen boven wegen, spoorwegen en water met de werkelijke hoogte, om de onderlinge ligging objectmatig vast te kunnen leggen.
- Het in beeld brengen van potentiële overstromingsgebieden bij hoog water en het inrichten van retentiegebieden.
- Het uitvoeren van 'straal' zichtanalyses' t.b.v. de plaatsing nieuwe zendmasten t.b.v. de verbetering van het GSM netwerk of de aanleg van UMTS netwerken door telecom operators.
- Het uitvoeren van geluids- (en stank) analyses gegeven het terreinrelief en de objecten hierin bij bepaalde weersomstandigheden.

berekende TIN niet te groot is. Mocht dit het geval zijn, dan wordt het punt weer teruggeplaatst in het TIN. Het resultaat is te zien in de figuren 8 en 9, waarbij steeds de representatie *met* (links) en *zonder* (rechts) overbodige punten wordt getoond. In de toekomst kan de generalisatie worden verbeterd door de 2D objecten (of nog beter de 2,5D objecten) mee te nemen in de generalisatie.

Met al de genoemde verbeteringen vormen de TIN-netwerken een krachtige opslagstructuur, die zowel bij de integratie (inclusief de generalisatie / puntenfiltering vooral) van terreinmodel en 2D geobestanden, als bij de latere toepassing gebruikt kan worden.

FRISO PENNINGA EN PETER VAN OOSTEROM
SECTIE GIS TECHNOLOGIE, OTB, TU DELFT

JANTJEN STOTER



Figuur 8 en 9. Detail van TIN: links met alle AHN punten, rechts met alleen de relevante punten.