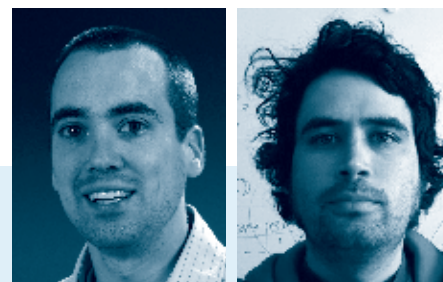


Topologisch consistente 3D-stadsmodellen

Een aanpak op basis van extrusie en triangulatie

ir. Martijn Meijers en dr. Hugo Ledoux
Onderzoeksinstituut OTB, TU Delft



Extrusie is een simpele methode om een stadsmodel te maken. Hiermee worden grondvlakken omhoog getrokken om tot een eenvoudige 3D-representatie te komen. Hoewel bestaande extrusiemethoden gemakkelijk te implementeren zijn, zullen de verkregen stadsmodellen niet per definitie topologisch consistent zijn. Hierdoor kan het stadsmodel vaak niet voor andere doeleinden dan visualisatie worden gebruikt. In dit artikel wordt een nieuwe extrusiemethode gepresenteerd om tot een consistent stadsmodel te komen. Als basis wordt gebruikgemaakt van een geconstraineerde triangulatie. Het uiteindelijke model kan vervolgens in diverse formaten worden opgeslagen. Met de aanpak is het gelukt om een consistent stadsmodel van de campus van de TU Delft te verkrijgen.

Met meettechnieken zoals laserscanning vanuit de lucht is het mogelijk om snel en gemakkelijk grote hoeveelheden hoogte-informatie voor een gebied in te winnen. Met behulp van de ingewonnen hoogtes en een digitaal topografisch bestand kunnen automatisch 3D-stadsmodellen worden gecreëerd. In de context van het RGI-project 3D Topografie is hiervoor een aanpak ontwikkeld om te komen tot topologisch consistente 3D-stadsmodellen waarin terrein en gebouwen (ook onderling) perfect op elkaar aansluiten en zodoende opgeslagen kunnen worden in een datamodel gebaseerd op tetrahedra [Si, 2004; Penninga, 2008]. Bij gebruik van dit datamodel wordt het hele beschreven gebied opgedeeld in zogenaamde tetrahedra en elk geografisch object wordt gerepresenteerd door een set van aansluitende tetrahedra.

Om een 3D-stadsmodel van de campus van de TU Delft te verkrijgen zijn we begonnen met een van de simpelste methoden: extrusie. Gegeven een aantal grondvlakken, samen met een toegekende hoogte (bijvoorbeeld afkomstig vanuit een helikopter genomen laserscan), is het mogelijk om een blokkendoorsre-

presentatie van gebouwen te verkrijgen. Daken worden namelijk voorgesteld door horizontale vlakken, zonder enige andere structuur. Deze representatie is binnen CityGML [Kolbe, 2008] de geadopteerde internationale standaard voor representatie en opslag van 3D-stadsmodellen, beter bekend als LoD₁ (Level of Detail 1).

De meeste GIS-pakketten bieden een extrusiefunctie aan. In ons geval werden daarmee echter al vrij snel problemen geconstateerd toen het resultaat in ons op tetrahedra gebaseerde model zou moeten worden opgeslagen. De stadsmodellen verkregen met standaard extrusie-software bleken namelijk niet topologisch consistent te zijn terwijl dit een noodzakelijke voorwaarde is om een geldige tetrahedralisatie te kunnen berekenen. Een standaard extrusie kan onder andere resulteren in dubbele punten, overlappende vlakken en vlakken die elkaar op plekken snijden waar zich geen lijn of punt bevindt. Na extrusie is elk volume – polyhedron – dan op zichzelf wel consistent, maar het totale model kan alsnog fouten bevatten. Het moet hier ook benadrukt worden dat topologische consistentie niet alleen een bruikbaar en zinnig concept is bij tetrahe-

dralisatie van 3D-stadsmodellen. Topologie is al jaren een begrip in 2D [Molenaar, 1998; Van Oosterom et al., 2002] en beschikbaar via verschillend GIS-gereedschap voor het verkrijgen en bijhouden van consistente datasets.

Van 2D naar 3D met extrusie, de moeilijkheden

In de context van 3D-stadsmodellen betekent extrusie dat een gebouw (een polyhedron) tot stand komt door het grondvlak (een polygoon) 'omhoog te trekken'. Voor een grondvlak met n -lijnen wordt het resulterende gebouw beschreven door $n+2$ vlakken:

- het grondvlak, de vloer;
- het dak, dat dezelfde geometrie heeft als de vloer maar waarbij alle punten zich op de 'extrusie-hoogte' bevinden;
- elke lijn wordt een muur (een rechtopstaand vlak).

Als de grondvlakken individueel omhoog worden getrokken, of wanneer een gebouw geen directe buur heeft, dan is het eenvoudig om een topologisch consistente 3D-representatie van een gebouw te maken. Echter, op het moment dat er aangrenzende grondvlakken zijn, wordt dit moeilijker.

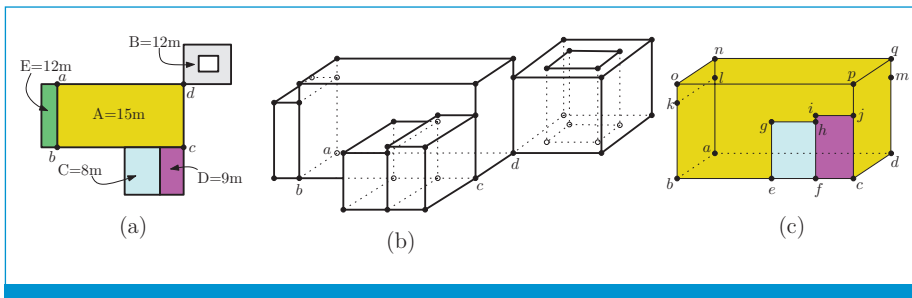


Fig. 1. Overzicht van het omhoogtrekken van gebouw A. (a) Het grondvlak van gebouw A is de polygoon $abcd$. (b) Perspectivisch aanzicht van het uiteindelijke resultaat (met aan elkaar sluitende gebouwen). (c) Gebouw A wordt beschreven door een collectie vlakken.

In fig. 1a zijn vijf aan elkaar grenzende grondvlakken gegeven, elk met een verschillende hoogte. Extrusie moet leiden tot het eindresultaat gegeven in fig. 1b. Het grondvlak van gebouw A wordt gevormd door de punten $abcd$. Fig. 1c toont het resulterende gebouw met verschillende tinten grijs voor elk omhooggetrokken vlak. Gebouw A bevat 17 punten en negen vlakken, terwijl een 'normale' extrusie zou bestaan uit acht punten en zes vlakken. Andere relevante zaken zijn:

- Lijn ab wordt na omhoogtrekken door twee vlakken ($abkl$ & kln) gerepresenteerd, omdat A en E niet even hoog zijn. Verder zal vlak $abkl$ bij zowel gebouw A als E behoren;
- Gebouwen A en B grenzen in een punt en hebben verschillende hoogtes, wat betekent dat de lijnen die uitkomen in punt d worden uitgetrokken naar vlakken, waarbij zich op de hoogte van B ook een punt zal bevinden, namelijk punt m in de twee vlakken $cdmqpj$ en $dmqnl$. Merk verder op dat voor punt l in het tweede vlak hetzelfde geldt, omdat E aan A grenst en lager is;
- Lijn bc is de meest bewerkelijke lijn om omhoog te trekken, aangezien hier de meeste buurvlakken van gebouw A te vinden zijn.

tot een 3D-stadsmodel te komen dat ook getetrahedraliseerd kan worden. Onze aanpak heeft als uitgangspunt een topologisch consistente 2D-set met grondvlakken, waarbij aan elk vlak de gewenste extrusiehoogte als attribuut is toegekend. In de praktijk is het veelal nodig om een aantal opschoonstappen te zetten om tot dit 2D topologisch consistente uitgangspunt te komen (zie fig. 3).

Vervolgens worden de hoogtepunten getrianguleerd en wordt aan alle vertices van de grenzen van de grondvlakken een geïnterpoleerde hoogte toegekend (dit

gebeurt op basis van lineaire interpolatie met behulp van het verkregen Triangular Irregular Network – TIN). Om er tevens voor zorg te dragen dat de grondvlakken en het TIN uiteindelijk op elkaar zullen aansluiten, worden alle hoogtepunten verwijderd die binnen de begrenzing van de grondvlakken vallen en worden de grenzen als constraints opgenomen in het TIN (zie kader Geconstraine Triangulatie). Het opnemen van de grondvlakken in een triangulatie is niet alleen nuttig om de topologische buurrelaties tussen de ruimtelijke primitieven op te nemen, het heeft ook nog andere voordelen voor de extrusie. Het grootste voordeel is dat de uiteindelijke gebouwen perfect aansluiten op het digitale terreinmodel. Een TIN kan hiervoor direct worden gebruikt en mocht het digitale terreinmodel raster gebaseerd zijn, dan kan dit worden geconverteerd naar een TIN.

Extrusie vindt plaats met een door ons ontworpen algoritme, EXTRUDE gedoopt. Het EXTRUDE-algoritme werkt als volgt: uit de geconstraine Delaunay-triangulatie worden de grond- en dakvlakken van de gebouwen verkregen door de juiste

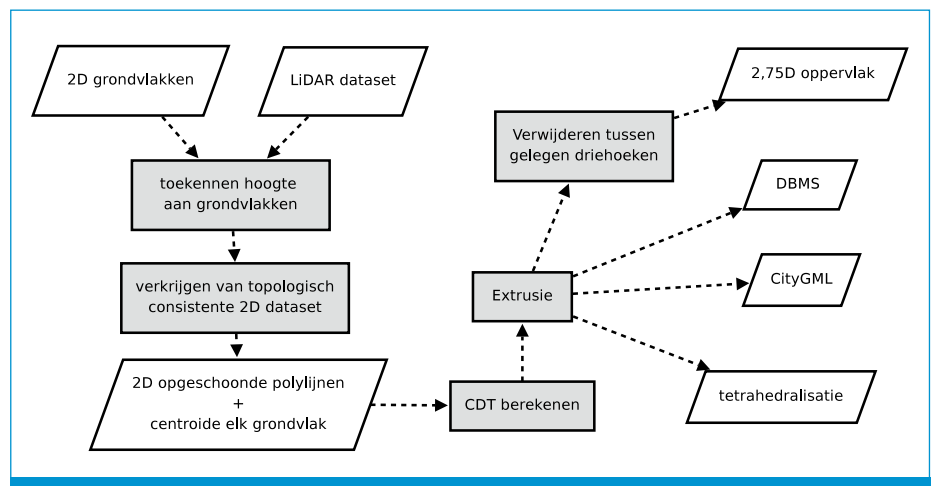


Fig. 2. Onze aanpak om te komen tot een consistent 3D-stadsmodel.

Van deze waarnemingen kan worden afgeleid dat er bij extrusie twee factoren van invloed zijn op de topologische consistentie van het resultaat:

1. de relatieve hoogte van aan elkaar grenzende gebouwen;
2. de manier waarop de gebouwen aan elkaar grenzen.

Onze aanpak

Zoals fig. 2 illustreert, bestaat onze aanpak uit verschillende stappen om automatisch

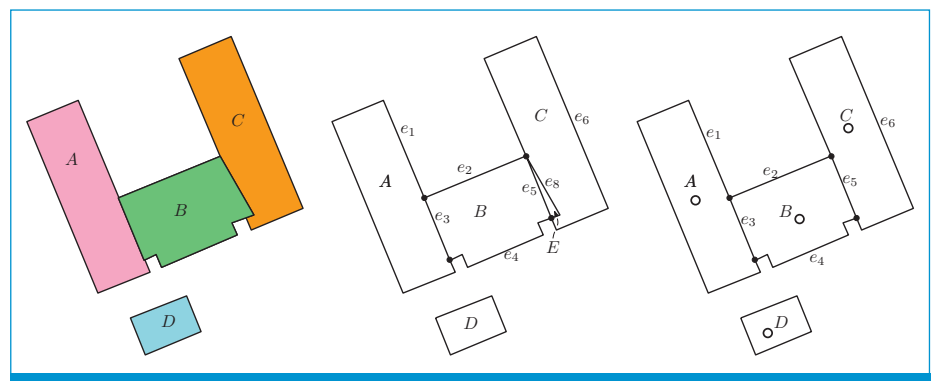


Fig. 3. Het opschonen van een invoerdataset, zodat overlappende gebouwen niet meer voorkomen.

driehoeken uit de CDT te selecteren en deze, in het geval van de dakvlakken, op de juiste extrusiehoogte te brengen. Dan worden de muren gecreëerd door alle geconstraineerde edges uit de CDT te bezoeken en deze omhoog te trekken, waarbij de configuratie van aan elkaar liggende grondvlakken in het oog wordt gehouden. In de vorige paragraaf hebben we laten zien dat het verkrijgen van de geometrie van de (verticale) muurvlakken complexer is dan dat dit op het eerste gezicht lijkt vanwege hoogteverschillen en de manier waarop gebouwen aan elkaar grenzen. Het algoritme verhelpt dit probleem elegant door gebruik te maken van het concept node-kolom. Op de plek van elke node uit de triangulatie wordt een node-kolom opgericht. De node-kolommen dragen er zorg voor dat de rechtopstaande vlakken (de muren) topologisch consistent zullen zijn (zie voor meer details het kader: De node-kolommethode). Hiervoor biedt de CDT-structuur eenvoudig toegang tot alle relevante informatie. Het algoritme levert uiteindelijk een set gebouwen en een set topologisch consistente vlakken in 3D als uitvoer. Een gebouw is hierbij gedefinieerd als een container voor de set van vlakken (die de begrenzing van het gebouw voorstellen) en is dus een polyhedron. Vlakken van aan elkaar gelegen polyhedra worden niet gedupliceerd en een gebouw heeft simpelweg referenties naar de bijbehorende vlakken. Om in plaats van een 3D-stadsmodel een 2,75D-oppervlakterepresentatie van alle objecten uit te voeren (bestaande uit het terrein, de muren en de daken van de gebouwen), volstaat het om de driehoeken tussen het terrein en de gebouwen, en de driehoeken tussen aan elkaar

grenzende gebouwen te verwijderen (met de geschetste methode zijn al deze driehoeken eenvoudig aan te wijzen).

Implementatie

Onze implementatie leest een set aan polygonen (grondvlakken) waaraan een attribuut met de hoogte voor de extrusie is toegekend. Omdat de input voor onze procedure bestaat uit een set van polygonen, betekent dit dat elke polygoon onafhankelijk in de dataset aanwezig is. Een lijnsegment dat de grens vormt tussen twee aan elkaar liggende polygonen komt twee keer voor. In de praktijk komt het hierbij vaak voor dat polygonen elkaar voor een deel overlappen, of dat er overshoot- of undershoot-problemen zijn door 'snapping' van lijnen bij objectvorming. Om een topologisch consistente 2D-dataset als uitgangspunt te krijgen, gebruiken we het open source GIS-pakket GRASS. Overigens zouden hiervoor ook andere GIS-pakketten gebruikt kunnen worden.

Vervolgens wordt de CDT berekend met behulp van de CGAL-bibliotheek. De invoer voor de CDT-berekening is de uitvoer van GRASS: de grenzen van de grondvlakken (dit zijn de constraints voor de triangulatie) plus per grondvlak een punt dat gegarandeerd binnen de grenzen van het grondvlak ligt. Voor het gemak noemen we dit punt hier de centroide, ook al kan een echte centroide buiten de grenzen van een grondvlak vallen. Aangezien de CDT-datastructuur niet automatisch kennis bevat over de polygonen, is het nodig om elke driehoek in de CDT te markeren met het identificatieattribuut van het gebouw waar deze driehoek bij hoort. Hiervoor gebruiken we

Geconstraineerde triangulatie

Met een set M van punten en rechte lijnsegmenten daartussen in R_2 is een geconstraineerde triangulatie van M een triangulatie waarbij elk segment uit M ook voorkomt in de triangulatie. Zoals getoond in fig. 4, wordt elk polygoon opgeknipt in driehoeken en om de kennis over de polygonen te behouden wordt aan elke driehoek het identificerende attribuut van de invoerpolygoon, in dit geval de kleur, toegekend. Elke polygoon wordt zo gerepresenteerd door een set van aan elkaar gelegen driehoeken. Ook gaten in polygonen kunnen op deze manier worden gerepresenteerd. Een gat is altijd verbonden aan de buitenring van een polygoon door een (ongeconstraineerde) triangulatie edge.

als startpunt de centroide van elk grondvlak (verkregen met behulp van GRASS) en lopen we in de triangulatie om aangrenzende driehoeken te bezoeken, totdat een geconstraineerde edge onze weg blokkeert. Op deze manier wordt aan elke driehoek de identificatie van het bijbehorende grondvlak toegekend. De driehoeken, die het universum vormen (de ruimte tussen de grondvlakken), worden ook als zodanig aangemerkt (fig. 4 toont dit proces).

Het EXTRUDE-algoritme is door ons in Python geïmplementeerd. Omdat ons programma een lijst van uniek geïoriënteerde vlakken en referenties tussen de vlakken en de gebouwen bijhoudt, is het eenvoudig om te komen tot verschillende soorten uitvoer. Op dit moment kan er worden uitgevoerd naar:

- een CityGML-bestand;
- een PLC-bestand, als invoer voor tetrahedralisatie;
- een lijst van vlakken en een lijst van gebouwen die beide rechtstreeks in een database opgeslagen kunnen worden;
- een 2,75D oppervlakterepresentatie van het terrein en alle gebouwen.

Experiment met de TU Delft-campus

Om onze aanpak te testen, hebben we een experiment uitgevoerd met data van de campus van de TU Delft. Voor dit gebied van 2,3 km² met 370 gebouwen werd de

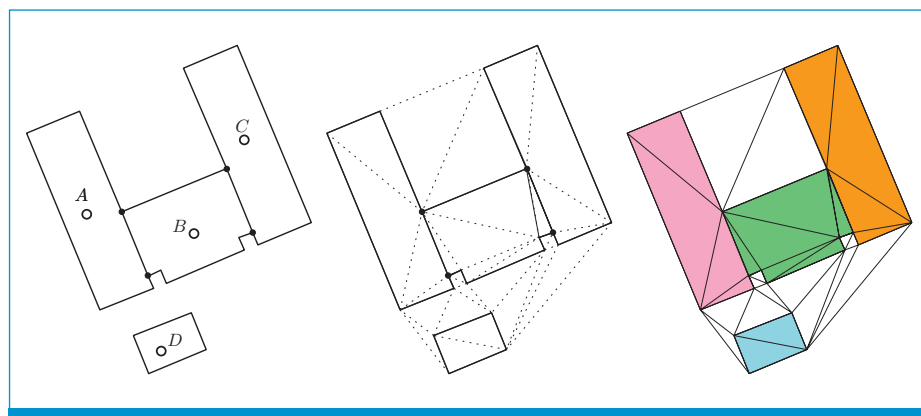


Fig. 4. Het berekenen van de CDT op basis van een topologisch consistente 2D-dataset. Elke driehoek wordt vervolgens gemarkeerd met het identificatieattribuut van het gebouw waar deze driehoek bij hoort.

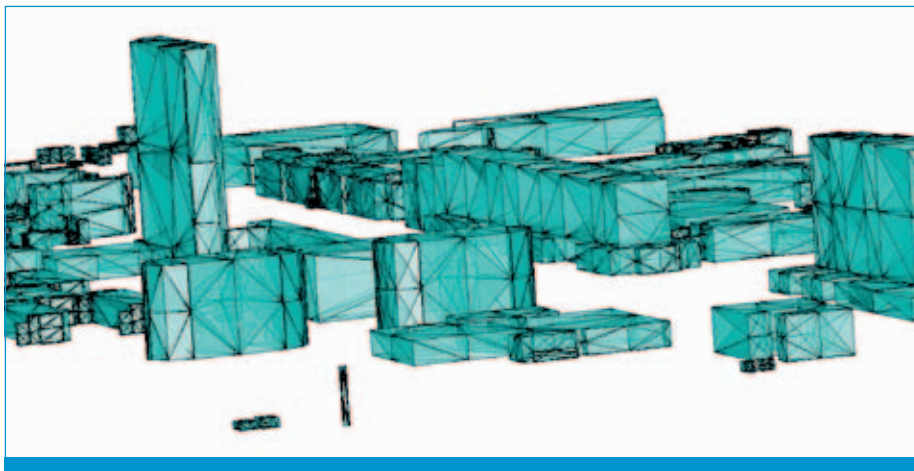


Fig. 5. Een deel van de campus van de TU Delft getetrahedraliseerd.

Grootschalige Basiskaart Delft gebruikt. Aangezien dit nog een lijngericht bestand was, zijn hieruit eerst gebouwpolygoonen gevormd. Ook werd aan elk polygoon een hoogte toegekend. Deze waarde werd verkregen door de mediaan van alle z-waarden van de AHN-hoogtepunten in elk grondvlak te berekenen. Vervolgens werd de dataset met behulp van GRASS opgeschoond, wat het uitproberen van verschillende parameters voor snapping en verwijderen van (kleine) overlappende delen betekende, totdat het aantal ingegeven polygoonen gelijk bleef aan het aantal na de opschoonactie. Aangezien er vrij veel topologische fouten in het bestand zaten, waren hiervoor verschillende iteraties nodig. Deze stap zou overbodig zijn geweest als de invoer van de grondvlakken al topologisch consistent was.

Na al dit voorbereidende werk was het eenvoudig om de CDT te berekenen en met EXTRUDE te komen tot een 3D-stadsmodel dat getetrahedraliseerd kon worden. Fig. 5 laat een deel van de omhooggetrokken campus zien nadat deze is getetrahedraliseerd. Zoals in de figuur te zien is, is elke polyhedron opgedeeld in een set van tetrahedra. Ook moet worden opgemerkt dat de tetrahedra die de lucht opdelen wel in het model aanwezig zijn maar niet worden getoond. Voor onze set van 370 grondvlakken, werden 5.841 punten en 8.152 driehoeken verkregen. Het resultaat van het getetrahedraliseerde model bestaat uit 20.486 tetrahedra.

Conclusies

In dit artikel is een nieuwe aanpak beschreven voor extrusie. De aanpak

kenmerkt zich door een sterke focus op topologische relaties en een consistente representatie hiervan. We hebben triangulatie gebruikt als basis voor de extrusie. Dit heeft volgens ons diverse voordelen. Ten eerste: alle topologische relaties tussen grondvlakken zijn eenduidig opgeslagen en bevroegbaar. Ten tweede: vlakken

kunnen direct worden getrianguleerd, wat de flexibiliteit biedt om ze naar diverse formaten uit te voeren (waaronder volledige polyhedra of een 2,75D oppervlakte-representatie). Ten derde: getrianguleerde oppervlakken kunnen direct gebruikt worden voor visualisatie, aangezien de meeste grafische hardware driehoeken als primitieven gebruikt. Ten vierde: ons algoritme kan gemakkelijk grote datasets aan, omdat alle operaties om topologische relaties te bevragen lokaal zijn en triangulaties van datasets met miljoenen punten snel kunnen worden berekend.

Aangezien in 3D weinig tot geen GIS-gereedschap beschikbaar is om deze topologische relaties voor een set van objecten te beheren (zoals in 2D wel het geval is), is meer onderzoek hier wenselijk en noodzakelijk. Onze aanpak is een eerste stap en geeft hopelijk meer duidelijkheid over het verkrijgen van 3D topologisch consistente stadsmodellen. 📍

De node-kolom-methode

Een node-kolom is een gesorteerde lijst van alle hoogtes van aangrenzende gebouwen en de vloerhoogte op die plek. Fig. 6a illustreert een deel van de node-kolommen voor gebouw A (uit fig. 1). Ons EXTRUDE-algoritme verzorgt de extrusie door te analyseren hoeveel grondvlakken er aan een geconstraineerde edge grenzen en de hoogtes bij deze grondvlakken in ogenschouw te nemen.

Bij het vormen van de verticale vlakken wordt gesteund op de node-kolommen, om zo de correcte geometrie samen te stellen. Het voorbeeld in fig. 6 illustreert het gebruik van de node-kolommen: de node-kolommen bij nodes *e* en *f* worden gebruikt als edge *ef* omhoog wordt getrokken. Edge *ef* grenst aan het grondvlak van gebouw A en C, waarbij gebouw A de hoogste van de twee is. De vloerhoogte wordt in dit voorbeeld op 0 m gezet (maar hoogtes kunnen net zo goed afkomstig zijn uit een TIN). Omdat gebouw C het kleinste van de twee gebouwen is, wordt eerst met behulp van de twee node-kolommen een tussenmuur gevormd, wat uiteindelijk resulteert in het rechtopstaande vlak *eghf*. Als tweede wordt een vlak gevormd dat in hoogte loopt vanaf het laagste gebouw (gebouw C, 8 m) tot aan de hoogte van het hoogste gebouw (A, 15 m). Dit leidt tot het vlak *grsih*. Van belang is dat punt *i* in dit vlak wordt ingevoegd, om een topologisch consistent resultaat te krijgen (omdat de hoogte van gebouw D, dat aan A en C raakt, verschilt van de hoogte van gebouw C).

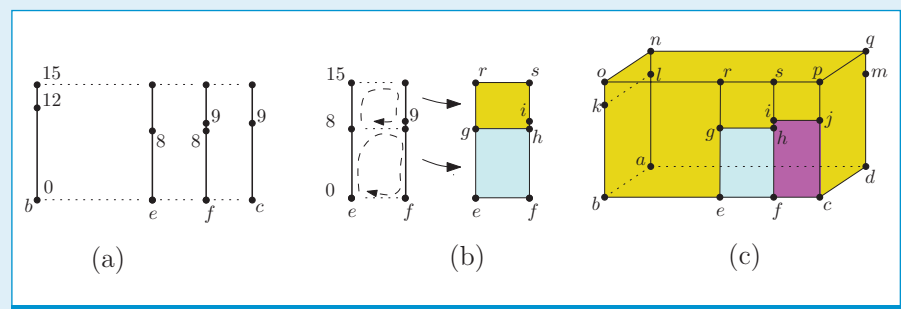


Fig. 6. De node-kolommethode.

Samenvatting

Topologisch consistente 3D-stadsmodellen

In het kader van het RGI-project 3D Topografie is een aanpak ontwikkeld om te komen tot stadsmodellen, waarin terrein en gebouwen perfect op elkaar aansluiten en zodoende getetrahedraliseerd kunnen worden.

Kenmerkend voor de aanpak is de focus op topologische relaties. Als basis is triangulatie gebruikt en de zogenaamde node-kolommethode zorgt voor een topologisch consistent resultaat.

Aangezien er weinig GIS-gereedschap beschikbaar is om topologische relaties in 3D te beheren, is meer onderzoek noodzakelijk. De beschreven aanpak is een eerste stap in deze richting en geeft hopelijk meer duidelijkheid over het verkrijgen van topologisch consistente 3D-stadsmodellen.

Summary

Topologically consistent 3D city models

For the RGI project 3D Topography a new approach has been developed to obtain city models in which the terrain and the buildings fit together perfectly and thus can be tetrahedralized.

The approach distinguishes itself by focusing on topological relationships. A triangulation has been used as a starting point and the node column method guarantees a topologically consistent result.

Because there are only a few 3D GIS tools available to maintain topological relationships, research should be conducted in this area.

The approach proposed is a first step in this direction and hopefully gives more clarity on how to construct topologically consistent 3D city models.

Literatuur

- Kolbe, T. H. (2008). *Representing and exchanging 3D city models with CityGML*. In: *3D Geo-Information Sciences*, hoofdstuk 2, p. 15–31. Springer.
- Molenaar, M. (1998). *An introduction to the theory of spatial object modelling for GIS*. Taylor & Francis.
- Penninga, F. (2008). *3D Topography: A Simplified Complex-based Solution in a Spatial DBMS*. PhD thesis, TU Delft, Delft.
- Si, H. (2004). *Tetgen: A quality tetrahedral mesh generator and three-dimensional Delaunay triangulator*. User's manual v1.3.9, WIAS, Berlijn, Duitsland.
- Van Oosterom, P., J. Stoter, W. Quak, en S. Zlatanova (2002). *The balance between geometry and topology*. In: *Advances in Spatial Data Handling - 10th International Symposium on Spatial Data Handling*, p. 209–224. Springer.

advertentie



MVO

Martens en Van Oord

Ben je nog een 'groentje' of heb jij je 'sporen' al verdiend...

Martens en Van Oord is actief in de grond-, weg- en waterbouw en daaraan gerelateerde disciplines, zoals de handel in bouwgrondstoffen. Sinds de oprichting in 1986 heeft het bedrijf zich ontwikkeld tot een toonaangevend bedrijf binnen de sector.

Grote spraakmakende projecten, zoals hoogwaterbescherming, waterbodemsaneringen, complexe bouwkuipen en grote infrastructurele werken schreeuwen om professionals. Onze opdrachtgevers dagen ons uit om projecten integraal aan te pakken. Deze uitdaging gaan wij graag aan met gedreven vakmensen.

Als ambitieus bedrijf streeft Martens en Van Oord ernaar om op een duurzame wijze te groeien.

Martens en Van Oord

Rederijweg 6
Postbus 326
4900 AH OOSTERHOUT
Tel. 0162 - 47 47 47
Fax 0162 - 47 47 48

Om onze ambities ook in de toekomst waar te kunnen maken zijn we op zoek naar enthousiaste en getalenteerde collega's voor de volgende functies:

• Teamleider peil- en meetdienst

De teamleider die wij zoeken, geeft leiding aan de medewerkers van de peil- en meetdienst. Je ervaring maakt dat je voor zowel je eigen medewerkers, maar ook voor je overige collega's, dient als vraagbaak en kenniscentrum. Je volgt de ontwikkelingen op je vakgebied en waar nodig weet je ze te implementeren. Daarnaast ben je verantwoordelijk voor het beheer, onderhoud en de reparatie van alle landmeet-, survey- en GPS-apparatuur.

• Surveyor

De surveyor die wij zoeken, is actief betrokken bij plaatsbepaling en metingen op en rond het water. Je houdt je dagelijks bezig met het uitvoeren van peil- en meetwerk en het uitwerken en archiveren van de verkregen meetgegevens. Je bent op een project het aanspreekpunt voor de uitvoerder en daarnaast heb je een begeleidende en sturende rol voor de uitvoerende medewerkers. Naast deze werkzaamheden houd je je bezig met het invoeren en uitlezen van data welke nodig is voor de juiste werking van de GPS-machinebesturing, waarmee nagenoeg ons gehele machinepark is uitgerust.

Kijk voor meer informatie op onze website:

www.mvogroep.nl

