

# Analyse van de morfologie en bewaringstoestand van een deel van het Romeinse aquaduct van Tongeren (prov. Limburg) met gebruik van het DHMV en erosiemodellering



Erwin Meylemans<sup>1</sup>

## 1 Inleiding

Het gekende deel van het Romeinse aquaduct van Tongeren bestaat uit een grote aarden wal, gedeeltelijk onder bos (de zgn. *Beukenberg*), gedeeltelijk in akkerland gelegen. Dit laatste stuk, ongeveer 3/5 van de lengte van het aarden monument, werd nog maar relatief recent (begin jaren 1990) ingrijpend aangetast door de ruilverkaveling *Widooie*. Met deze verkaveling werden grote gebruikspcelen dwars over het monument aangelegd, waardoor het heuvellichaam momenteel zeer sterk is aangetast door erosie.

Dit artikel onderzoekt de mogelijkheden om via relatief nieuwe instrumenten als het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (DHMV)<sup>2</sup> en erosiemodelleringen de impact van deze erosie en de algemene bewaringstoestand van het monument in kaart te brengen. Vooreerst wordt het DHMV ook gebruikt om meer gegevens over de dimensies en het huidige uitzicht van de aarden wal (volume, hellingsgraad enzovoort) te karteren. Door deze gegevens te vergelijken met hypothetische reconstructies van het vroegere uitzicht van het aquaduct dienen ze als kader voor het inschatten van de bewaringstoestand van de verschillende delen van het aquaduct.

Er dient benadrukt te worden dat deze studie enkel het gekende tracé van het aquaduct als onderwerp heeft. Het betreft de laatste ca. 4 km van het monument, waar het Tongeren bereikt. Dit artikel doet geen poging om op basis van bijvoorbeeld het DHMV de bovenloop van het aquaduct vóór dit gekende traject op te sporen, of een inschatting te maken waar het bronnengebied van het aquaduct moet gesitueerd worden. In de loop van deze studie werden hieromtrent wel enkele pogingen gedaan, echter zonder duidelijke resultaten. Dit is onder andere een gevolg van het feit dat het huidige beschikbare DHMV geen gegevens voor Wallonië bevat, waar een gedeelte van het vermoedelijke tracé moet gesitueerd worden. De mogelijkheden hiertoe dienen verder te worden onderzocht.

Ten slotte heeft dit artikel ook de bedoeling de voor heel Vlaanderen beschikbare erosiemodellen te introduceren als in-

strumenten voor het inschatten van bewaringspotentieel en bedreiging van het archeologische erfgoed.

## 2 Situering van het aquaduct

Het gekende tracé van het Romeinse aquaduct van Tongeren verloopt over de waterscheidingskam tussen het Maas- en Scheldebekken (fig. 1). Het monument is zichtbaar als een aarden wal vanaf het *Hoogveld* ten zuiden van *Widooie*, vanwaar het langs de westzijde van de kam naar het noordoosten loopt. Ten noorden van de weg van Tongeren naar Sint-Truiden, waar het Provinciaal Instituut voor Biotechnisch Onderwijs (PIBO) is gelegen, buigt het aquaduct af naar het oosten. Hier maakte het aquaduct vroeger een bocht om zo naar Tongeren te draaien (fig. 2). Met de aanleg van het PIBO werd deze zone echter aanzienlijk vergraven. Op een oude luchtfoto is nog te zien hoe deze bocht gemaakt werd door middel van twee knikken in het traject<sup>3</sup>.

Het bekendste en best bewaarde gedeelte, de *Beukenberg* (zones A & B op fig. 1), sluit in het noordwesten van Tongeren aan bij het tracé van de 2de-eeuwse stadsomwalling. Dit gedeelte loopt van west naar oost over een lengte van 1570 m (gemeten over de rug).

In het verleden werden verschillende theorieën geformuleerd over de oorsprong en functie van de *Beukenberg*. Op het einde van de 19de eeuw dacht F. Huybrigts dat de structuur te verklaren was als een verdedigingswal tegen de Germaanse invallen<sup>4</sup>. Het was pas in 1935 dat G. Sengers voor het eerst opperde dat het ging om een aquaduct, dat het Romeinse Tongeren van water voorzag<sup>5</sup>. Hoewel deze theorie sindsdien nog niet bewezen is door bijvoorbeeld sporen van waterleidingconstructies in of op het heuvellichaam, is deze verklaring door de ligging en aard van het monument de meest plausibele. Dit wordt verder eveneens ondersteund door de reconstructie van het vroegere uitzicht van het monument, waardoor een zeer gelijkmatig verval kan gereconstrueerd worden (cf. *infra* 3.3.5).

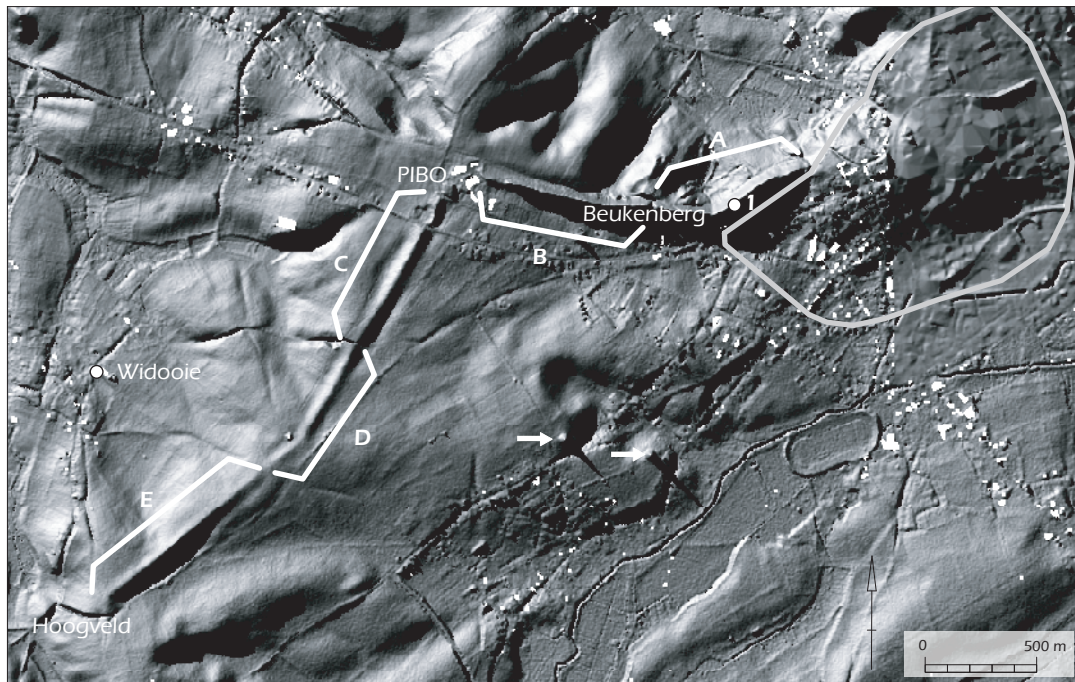
<sup>1</sup> Vlaams Instituut voor het Onroerend Erfgoed, Koning Albert II-laan 19 bus 5, 1210 Brussel.

<sup>2</sup> *S.n.* 2003.

<sup>3</sup> Mertens 1964, fig. 5.

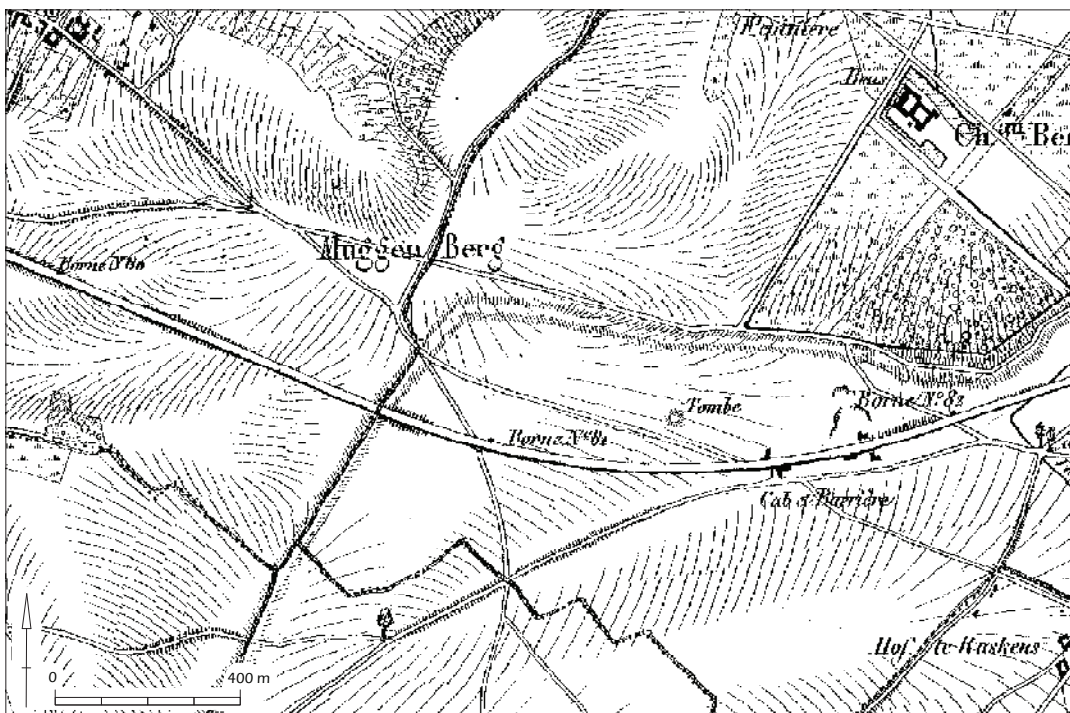
<sup>4</sup> Huybrigts 1896.

<sup>5</sup> Sengers 1935a, 1935b, 1935c.



**FIG. 1** Hillshadeverwerking van het DHMV (hoogte 10 maal vergroot, 315° azimut, 35° hoogte zonnestand). De 2de-eeuwse stadsmuur van Tongeren is in grijs omlijnd. Het aquaduct is duidelijk zichtbaar (aanduidingen A tot E) als een markante talud. Bemerkt ook de twee tumuli van Koninksem, aangeduid met pijltjes (DHMV: © AMINAL Afdeling Water, AWZ, AGIV). 1: de leemgroeve Baillien.

*Hillshade model of the DTM Flanders (height 10 times exaggerated, azimuth 315°, height 35°). The grey line indicates the 2nd century city wall of Tongeren. The aqueduct is clearly visible as a rectilinear earthwork. The two tumuli in the village of Koninksem (indicated by arrows) can also easily be recognised. 1: the loam quarry Baillien.*



**FIG. 2** Het aquaduct op de Vandermaelenkaart (Vandermaelen Ph. 1846-1854, Carte topographique de la Belgique). In de zone waar nu het PIBO gesitueerd is (de zone onder het toponiem Muggenberg) maakte de wal oorspronkelijk een bocht, komende van het zuidwesten, naar de Beukenberg in het oosten. *The aqueduct as shown on the Carte topographique de la Belgique (1846-1854), also known as the Vandermaelen map. Coming from the southwest, the earthen monument originally curved to the east (under the toponym Muggenberg), to the Beukenberg.*

De datering van het monument kon tot op heden slechts bij benadering vastgesteld worden<sup>6</sup>. Tijdens een proefsleufonderzoek in het uiterste oosten van de *Beukenberg* stelde W. Vanvinckenroye vast dat de aanleg van het heuvellichaam van recentere datum moet zijn dan de brandlaag van 69-70 n.Chr., en ouder dan de bouw van de eerste stadsmuur<sup>7</sup>, die moet gesitueerd worden in de tweede helft van de tweede eeuw. De constructie van het aquaduct wordt momenteel dan ook in verband gebracht met de grote heropbouw van de stad in de regeringsperiode van Vespasianus.

In februari van 1934 werd in de leemgroeve van M. Baillien op de zuidhelling van de *Beukenberg* de aarden wal voor het eerst onderzocht (1 op fig. 1). Op de natuurlijke bodem bevond zich een kleiige vochtige laag van ongeveer 25 cm dikte. Daarop was een leempakket van 8 m dikte gestapeld. In deze leemlaag werd Romeins aardewerk en glas aangetroffen.

In een handgeschreven document van H. Roosens<sup>8</sup>, dat wordt bewaard in de Koninklijke Musea voor Kunst en Geschiedenis (KMKG), wordt vermeld dat de heuvel op verschillende plaatsen werd onderzocht tijdens de bodemkartering van het gebied in 1950. Hij vermeldt hierbij: “Toen kwamen stenen te voorschijn die regelmatig geplaatst waren in twee lagen”.

De aanleg van het PIBO in 1970-71 werd opgevolgd door W. Vanvinckenroye. Hij stelde vast dat de kern van het aquaduct op die plaats overeenstemde met een 30 tot 50 m brede en ca. 2,5 m hoge wal, opgebouwd uit ‘grijsgele’ leem. Aan de voet van het heuvellichaam bevond zich een paalspoor, mogelijk afkomstig van het uitzetten van het tracé van het aquaduct<sup>9</sup>.

In 2000 werden bij het archeologisch onderzoek in het kader van de aanleg van de aardgasleiding Zeebrugge-Raeren twee grachten opgetekend, parallel lopend met de Romeinse weg Tongeren-Cassel. Daar ze zich bevinden op de plaats waar de waterleiding verder de waterscheidingkam zou kunnen volgen, maken ze mogelijk deel uit van hetzelfde monument<sup>10</sup>.

In 2002 werd door ARON bvba<sup>11</sup> het traject van het Romeinse aquaduct van het *Hoogveld* tot Tongeren topografisch opgemeten, voornamelijk met gebruik van GPS<sup>12</sup>. Deze metingen, genomen over de rug van het aquaduct en over verschillende transecten, dienden als basis om het aquaduct beter in kaart te brengen en een evaluatie te maken van de bewaringstoestand. Het rapport van ARON vermeldt het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (DHMV)<sup>13</sup>, dat toen nog in opmaak was, als een belangrijke toekomstige bron van meer gedetailleerde topografische informatie over dit monument.

Deze bijdrage gebruikt dit DHMV<sup>14</sup>, erosiemodellerings<sup>15</sup>, nieuw uitgevoerde metingen door het VIOE in april 2006<sup>16</sup>, luchtfoto's en de bodemkaart, als basis voor een meer precieze analyse van de morfologie en bewaringstoestand van het aquaduct, met de nadruk op het gedeelte gelegen in akkerland (zones C, D & E op fig. 1). Er wordt daarbij getracht de fysieke bewaringstoestand en de impact van de huidige erosie op het monument in te schatten.

Het dient ten slotte benadrukt te worden dat het Romeinse aquaduct van Tongeren door zijn uniek karakter ingeschat moet worden als zijnde van internationaal belang. Het gebruik van dergelijke massieve aardwerken voor de constructie van Romeinse aquaducten is immers nog maar in twee andere gevallen geattesteerd: de aquaducten van Dorchester<sup>17</sup> en Nijmegen<sup>18</sup>.

### 3 De afmetingen van het aquaduct

#### 3.1 Methodiek

Wat betreft het DHMV werd het standaard puntenbestand met een gemiddelde resolutie van 1 meetpunt per 20m<sup>2</sup> gebruikt, waarvan rasters werden afgeleid met een celgrootte van 5 m bij 5 m. Het puntenbestand met resolutie van 1 meetpunt per 4m<sup>2</sup> was voor deze analyse niet beschikbaar<sup>19</sup>. Voor de analyses van de rastergegevens werd ArcGIS 9.1<sup>20</sup> met de *Spatial Analyst*-extensie gebruikt.

De volgende aspecten werden gemeten: hellingsgraad, breedte, volume en dikte van het opgeworpen pakket. Voor deze metingen werd het aquaduct opgedeeld in 5 zones (fig. 1), die van elkaar gescheiden worden door onderbrekingen van het aquaduct. Dit zijn overal wegen, behalve tussen zones B & C, die van elkaar gescheiden zijn door het PIBO. De lengte van de zones, gemeten over de kam van het aquaduct, varieert tussen 690 en 930 m (tabel 1).

Om de verschillende metingen te kunnen uitvoeren dienden de DHMV-rastercellen behorend tot het aquaduct geïsoleerd te worden van deze behorend tot het omringende landschap. De perimeter van het aquaduct werd visueel afgebakend op basis van verschillende *hillshade*verwerkingen (met verschillende lichtinvalshoek) van het DHMV. Op die manier worden de randen van het aquaduct, waar de flanken een duidelijke knik maken met het omringende landschap, duidelijk zichtbaar.

Voor het bepalen van de hellingsgraad van de flanken van het aquaduct werd de *tool slope analysis* van *Spatial Analyst* gebruikt (fig. 3). Hierbij moet opgemerkt worden dat deze berekening afhankelijk is van de resolutie van het gebruikte hoogtemodel. In het algemeen blijkt dat de hellingsgraad afneemt wanneer de resolutie van hoogtemodellen groter wordt (het zgn. afrondingseffect<sup>21</sup>).

Voor het berekenen van het volume aarde in het aquaduct werd per zone een tweede DHM-puntenlaag aangemaakt waarvan de meetpunten binnen de perimeter van het aquaduct werden uitgeknipt. Hiervan werden via een *natural neighbour*<sup>22</sup>-interpolatie DHM's aangemaakt waarbij de hoogtes binnen de perimeter van het aquaduct werden geïnterpoleerd. Dit nieuwe raster simuleert op die manier het oorspronkelijke oppervlak zonder het aquaduct. Door een vergelijking met vroegere waarnemingen in de leemgroeve Baillien (cf. 3.3.1) kan ingeschat worden dat deze modellering als vrij nauwkeurig kan beschouwd worden.

6 Voor een overzicht van de gegevens hieromtrent cf. Ponzetta et al. 2002, 9-11.

7 Vanvinckenroye 1985, 45.

8 Roosens 1950: *Het probleem van de zeedijken!*, ongepubliceerde handgeschreven notitie.

9 Vanvinckenroye 1971.

10 In 't Ven et al. 2005.

11 www.aron-online.be.

12 Ponzetta et al. 2002 & 2003.

13 Een laseraltimetrische of Lidaropname (*Light Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging*) van heel Vlaanderen. S.n. 2003; De

Man & Brondeel 2004.

14 Het DHMV is beschikbaar sinds 2004.

15 Notebaert et al. 2006.

16 Meylemans & Van Laecke 2006.

17 Burgers 2001; Putnam 1997.

18 Schut 2005.

19 Cf. Vanmontfort et al. 2006.

20 <http://www.esri.com/products.html#arcgis>.

21 Notebaert et al. 2006, 39.

22 Deze interpolatiemethode vult de zones zonder meetwaarden (de verwijderde punten van het aquaduct) gradueel in, en simuleert zo een natuurlijke overgang.

Vervolgens werd dit raster afgetrokken van het DHMV met aquaduct, resulterend in een DHM met enkel het aquaduct. Het volume aan aarde aanwezig binnen het heuvellichaam werd vervolgens berekend door de som van de verschilwaarden van de z-waarden (hoogte in meter) te nemen, vermenigvuldigd met 25 (= lengte x breedte van de cellen, dus 5m x 5m). Dit raster geeft daarbij ook overal het hoogteverschil weer tussen het huidige oppervlak van het aquaduct en het oorspronkelijke oppervlak, waardoor dus de dikte van de aarden wal kan afgeleid worden. Dit wordt toegelicht aan de hand van zone A (cf. *infra* 3.2).

**TABEL I**

Overzicht van de meetgegevens per zone.

*Overview of the measurements per area.*

(\* De hellingsgraad van de talud is hierbij niet opgenomen)

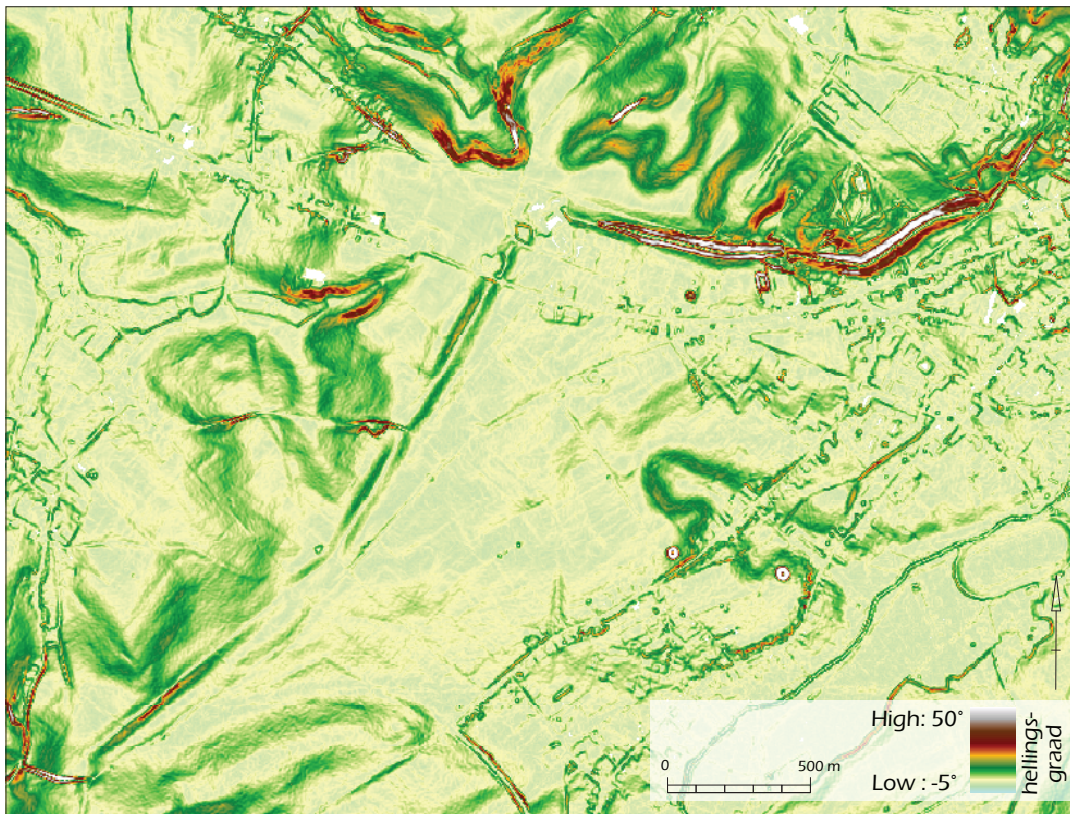
(\*\* Deze lengte wijkt af van de totale gekende lengte van het aquaduct (4120 m) omdat de zone van het P1BO niet werd opgenomen in de berekening)

	Lengte	Breedte	Helling	Vol. Tot.	Vol./100 m	Max. hoogte
<b>Zone A</b>	755 m	55-90 m	15-30°	301 453 m <sup>3</sup>	39 927 m <sup>3</sup>	14,3 m
<b>Zone B</b>	690 m	55 m	25-37°	223 012 m <sup>3</sup>	32 320 m <sup>3</sup>	12,8 m
<b>Zone C</b>	750 m	100 m	2-10°	96 303 m <sup>3</sup>	12 840 m <sup>3</sup>	4,1 m
<b>Zone D</b>	715 m	70 m	3-6°	71 975 m <sup>3</sup>	10 631 m <sup>3</sup>	3,0 m
<b>Zone E</b>	930 m	90 m	3-6°*	124 041 m <sup>3</sup>	13 338 m <sup>3</sup>	5,7 m
<b>Totaal</b>	<b>3840 m**</b>			<b>816 784 m<sup>3</sup></b>		

## 3.2 Beschrijving per zone

### 3.2.1 Zone A

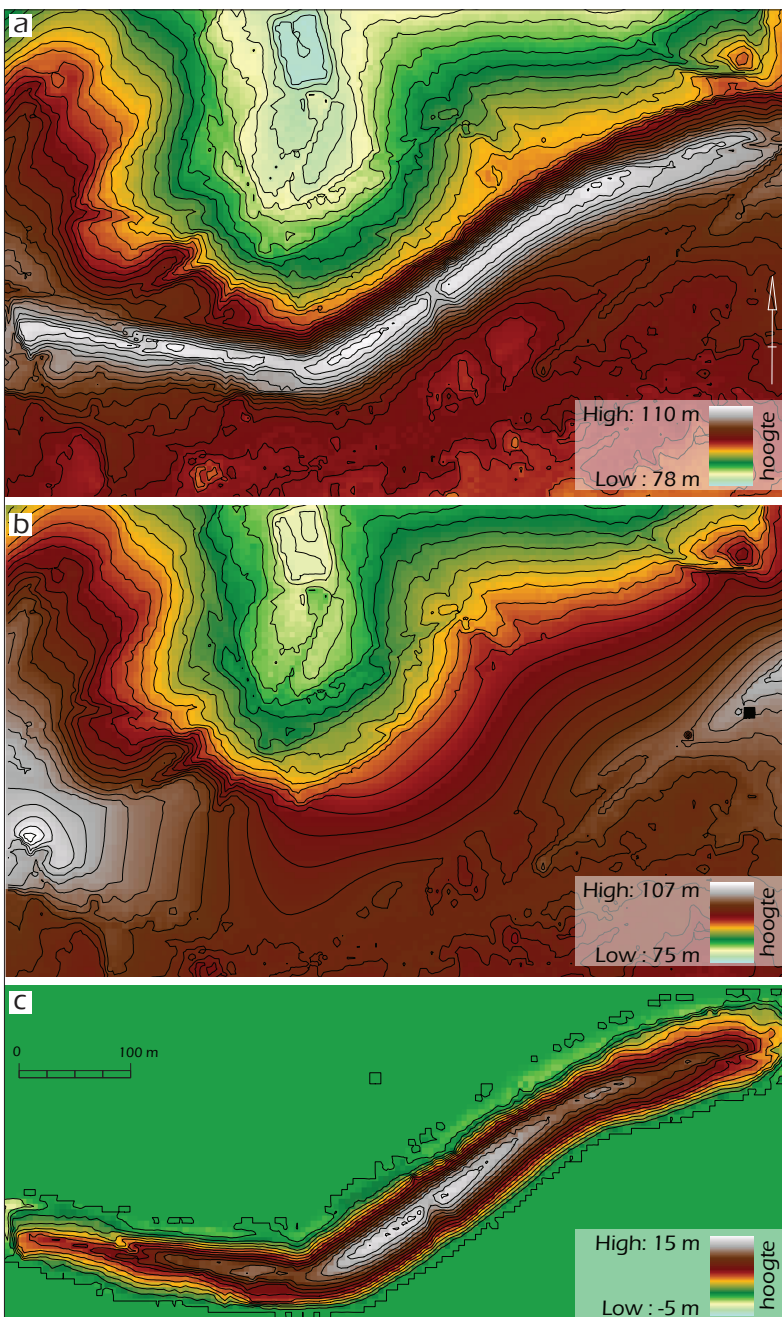
Dit gedeelte van het aquaduct loopt van een holle weg die de *Beukenberg* doorsnijdt in het westen tot aan het tracé van de 2de-eeuwse stadsmuur, waar de huidige *Legioenenlaan* loopt, in het oosten. De noordflank van deze zone, tevens gelegen op de noordelijke rand van de waterscheidingkam, is met bomen begroeid. De zuidflank is voornamelijk ingenomen door woonkavels (fig. 4).



**FIG. 3** Weergave van de hellingsgraad in het gebied, op basis van de functie *slope analysis* van *Spatial Analyst*.  
*Slope analysis of the area, based on the slope analysis tool of ArcGIS' Spatial Analyst.*



**FIG. 4** De Beukenberg (zones A & B) op luchtfoto (orthofoto's, middenschaalig, kleur, Limburg, opname 2003; © AGIV).  
De Beukenberg (areas A & B) as visible on aerial photographs.



**FIG. 5** a: zone A op het DHMV met het aquaduct (DHMV:© AMINAL Afdeling Water, AWZ, AGIV).  
b: zone A zonder aquaduct, met een simulatie van het natuurlijke oppervlak met gebruik van *natural neighbour*-interpolatie.  
c: het DHM van het geïsoleerde aquaduct in zone A, door het aftrekken van het DHM zoals zichtbaar op fig. 5b van het DHM zoals zichtbaar op fig. 5a.  
a: area A on the DTM, with the aqueduct clearly visible.  
b: area A with the aqueduct 'cut out'. Using a *natural neighbour* interpolation the original surface could be simulated.  
c: a DTM of the aqueduct in area A, isolated by subtracting the DTM as shown on 5b from the DTM as shown on 5a.

*Lengte en breedte*

Zone A is ca. 755 m lang. Het breedste gedeelte van deze zone varieert tussen 85 en 90 m. Het westelijke gedeelte, vóór de knik naar het noordoosten, wordt gradueel breder van west (ca. 55 m) naar oost (ca. 75 m).

*Hellingsgraad*

De noordelijke helling is steiler dan de zuidelijke flank. Dit heeft ongetwijfeld te maken met de bewaringstoestand van het monument en het landgebruik. De hellingsgraad van de noordelijke flank varieert van ca. 20° in het westen tot maxima van ca. 30° in het centrale gedeelte (de maximale gemodelleerde hellingsgraad bedraagt 32°). In de laatste 200 m van het oostelijke deel schommelt de hellingsgraad tussen 10° en 15°.

De hellingsgraad van de zuidelijke flank schommelt in het centrale deel rond 20° met maxima tot 24°, aan de westelijke en oostelijke uiteindes rond 15°.

*Volume en dikte*

Op het DHMV is het aquaduct in deze zone duidelijk zichtbaar als een langwerpige wal (fig. 5a). Door de toepassing van de verschillende stappen zoals beschreven in 2.1 kan de aarden ophoging van het aquaduct geïsoleerd worden (fig. 5c).

Door het aantal cellen van dit raster te vermenigvuldigen met de gemiddelde waarde van de rastercellen verkrijgt men de totale 'hoogte' (z-waarde) in meter van deze waarden. Door deze hoogte vervolgens te vermenigvuldigen met de oppervlakte van de individuele cellen (25 m<sup>2</sup>) wordt het volume berekend (dus: volume = hoogte x 25m<sup>2</sup>). In het geval van zone A is dit: 12 727 (aantal cellen) x 0,9474 4291 m (gemiddelde waarde van de cellen) x 25 m<sup>2</sup> = 301 453 m<sup>3</sup>. Dit betekent een gemiddeld volume van 39 927 m<sup>3</sup> per 100 m aquaduct.

Het DHM met het geïsoleerde aquaduct geeft overal de dikte van het aquaduct weer. Dit varieert in zone A van ca. 8 m in oosten en westen tot ongeveer 13 m in het centrale gedeelte.

**3.2.2 Zone B**

Deze zone loopt van het PIBO in het westen tot de holle weg in het oosten. Dit stuk van de *Beukenberg* ligt volledig onder bos (fig. 4 & fig. 6). De zuidelijke voet van de helling wordt echter door akkerbouw aangetast.

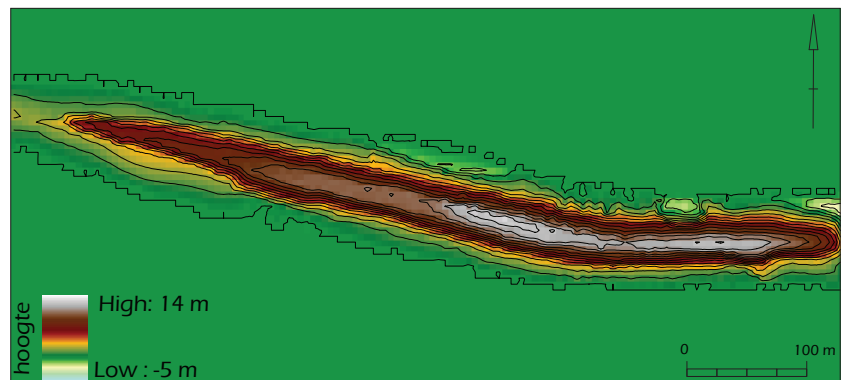
*Lengte en breedte*

Deze zone is ca. 690 m lang en ca. 55 m breed. In het westen wordt het aquaduct gradueel smaller, tot het verdwijnt.

**FIG. 6** Zone B vanuit het zuiden gefotografeerd, in de winter van 2006 (© VIOE).  
*Area B photographed from the south, during the winter of 2006.*



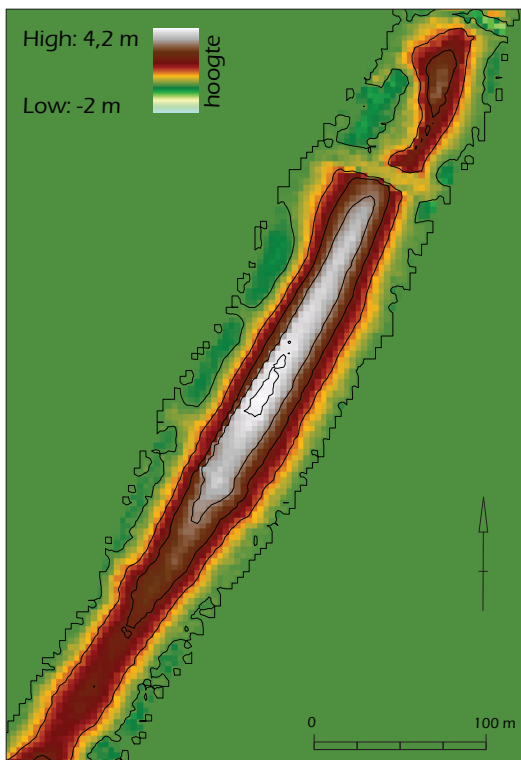
**FIG. 7** Het DHM van het aquaduct in zone B.  
*The DTM of the aqueduct in area B.*





**FIG. 8** Zone C tot E op luchtfoto. De kern van het aquaduct is zichtbaar als een lichtere verkleuring (orthofoto's, middenschalig, kleur, Limburg, opname 2003; © AGIV).

*Areas C to E as shown on aerial photographs dating from 2003. The eroded core of the aqueduct is visible as a strip of lighter coloured soil.*



**FIG. 9** Het DHM van het aquaduct in zone C.  
*The DTM of the aqueduct in area C.*

#### *Hellingsgraad*

De hellingsgraad schommelt overall rond  $25^\circ$ , met gemiddelde maxima tot  $37^\circ$ . Naar het westen wordt de helling geleidelijk minder steil.

#### *Volume en dikte*

Volgens dezelfde methode die werd toegepast in zone A, werd een raster opgebouwd dat diktes van het aquaduct simuleert tot maxima van ca. 12 m in het centrale gedeelte (fig. 7). Het totale volume van dit gedeelte wordt berekend op  $223\ 012\ \text{m}^3$ . Dit betekent gemiddeld  $32\ 320\ \text{m}^3$  per 100 m aquaduct.

### 3.2.3 Zone C

Zone C is in het noorden begrensd door het PIBO, in het zuiden door een holle weg (de weg van *Koninksem* naar *Widooie*) die het aquaduct doorsnijdt. Het gedeelte ten zuiden van de steenweg naar Sint-Truiden ligt in een boomgaard, de rest van deze zone in akkerland (fig. 8).

#### *Lengte en breedte*

Zone C is 750 m lang en overall ca. 100 m breed.

#### *Hellingsgraad*

De oostelijke helling schommelt qua hellingsgraad rond  $5^\circ$ . De westelijke helling is in het centrale gedeelte steiler (tot  $10^\circ$ ). In het zuidelijke gedeelte van deze zone is de westelijke helling (hellingsgraad tot  $2^\circ$ ) echter amper merkbaar in het landschap.

#### *Volume en dikte*

Het berekende volume bedraagt  $96\ 303\ \text{m}^3$ . Dit betekent  $12\ 840\ \text{m}^3$  per 100 m. In de centrale zone (het gedeelte in de boomgaard) wordt een maximale dikte tot 4,1 m bereikt (fig. 9). In deze boomgaard heeft het aquaduct nagenoeg overall een dikte tussen 3 en 4 m. Meer naar het zuiden, naar de holle weg toe en in akkerland gelegen, daalt dit tot 1,5 m.

### 3.2.4 Zone D

Zone D wordt in het noorden begrensd door de holle weg, in het zuiden door een ruilverkavelingsweg. De hele zone is gelegen in akkerland, bestaande uit grote percelen die dwars over het aquaduct zijn aangelegd.

#### *Lengte en breedte*

Zone D is ca. 715 m lang en overall ca. 70 m breed.

#### *Hellingsgraad*

De hellingsgraad schommelt overall tussen  $3^\circ$  en  $6^\circ$ , waarbij de westelijke flank over het algemeen iets steiler is.

#### *Volume en dikte*

Het totale volume bedraagt  $71\ 975\ \text{m}^3$ . Dit betekent  $10\ 066\ \text{m}^3$  per 100 m. De dikte bereikt maxima tot 3 m (fig. 10). In het zuidwesten schommelt dit rond de 1 m.

### 3.2.5 Zone E

Zone E loopt van de ruilverkavelingsweg in het noorden tot aan het *Hoogveld* in het zuiden, waar de aarden ophoging van het aquaduct geleidelijk verdwijnt. Nagenoeg de hele zone is in akkerland gelegen, met grote percelen die over het aquaduct

heen zijn aangelegd (fig. 11). Een uitzondering is een zone waar het aquaduct zichtbaar is als een talud met een steile helling in het oosten. Dit talud is als een houtkant zichtbaar en volgt de perceelsscheiding.

#### Lengte en breedte

Zone E is ca. 930 m lang en tot ca. 90 m breed.

#### Hellingsgraad

De maximale hellingsgraad bedraagt 18° op het talud. Ter hoogte hiervan schommelt de hellingsgraad gemiddeld rond 6°. In het noordoostelijke deel bedraagt de hellingsgraad overal ca 3°.

#### Volume en dikte

Het berekende volume bedraagt 124 041 m<sup>3</sup>. Dit betekent voor deze zone 13 338 m<sup>3</sup> per 100 m. In het noordoosten is de gemodelleerde dikte van het aquaduct het laagst, rond 1,2 m. Geleidelijk wordt het opgehoogde pakket dikker naar het zuidwesten, met een maximum van 5,4 meter op het talud. Het zuidwestelijke gedeelte is overal ongeveer 3 m dik (fig. 12).

### 3.3 Bespreking van de meetgegevens

#### 3.3.1 Algemeen

De meetgegevens zoals die hierboven werden vermeld, worden samengevat in tabel 1.

G. Sengers vermeldde in 1935 een onderzoek op de zuidelijke flank van de *Beukenberg*, in de leemgroeve Baillien (cf. 1 op fig. 1), waar de dikte van de lemen ophoging ongeveer 8 m bedroeg<sup>23</sup>.

Op deze plaats is de berekende dikte van de aarden wal inderdaad overal omtrent de 8 m. Dit bevestigt dat de gemodelleerde diktes zoals die hierboven zijn vermeld als vrij accuraat mogen beschouwd worden.

Er is een groot verschil tussen de enorme volumes en diktes, zoals die voor de *Beukenberg* (zones A en B) berekend worden, en deze voor de zones C tot E. Dit heeft enerzijds vooral te maken met het oorspronkelijke uitzicht van het aquaduct (cf. *infra*), waarbij voor zones C tot E een minder grote wal nodig was om het gewenste verval te verkrijgen, anderzijds wordt dit nog versterkt door het verschil in bewaringstoestand (cf. *infra*).

In contrast met de bewaarde diktes, zijn de breedtes van de zones C tot E veel groter dan deze van de *Beukenberg*. Dit is wellicht vooral te wijten aan het verschil in bewaringstoestand (cf. *infra*).

#### 3.3.2 De bewaringstoestand

De combinatie van de huidige dikte en de hellingsgraad van het aquaduct werden gebruikt om de bewaringstoestand van het monument te modelleren. Door een zogenaamde *natural breaks*-classificatie (waarbij de cellen gegroepeerd worden aan de hand van opvallende sprongen in de celwaarden) werden deze waarden per zone van het aquaduct opgedeeld in 9 klassen. De twee klassen met de hoogste waarden werden hierbij geïnterpreteerd als indicatief voor de beste bewaringstoestand, relatief per zone.

Op deze manier kan per zone ingeschat worden welk gedeelte het best bewaard is en dus het meest als referentie kan dienen voor het oorspronkelijke uitzicht van het aquaduct (fig. 13a en

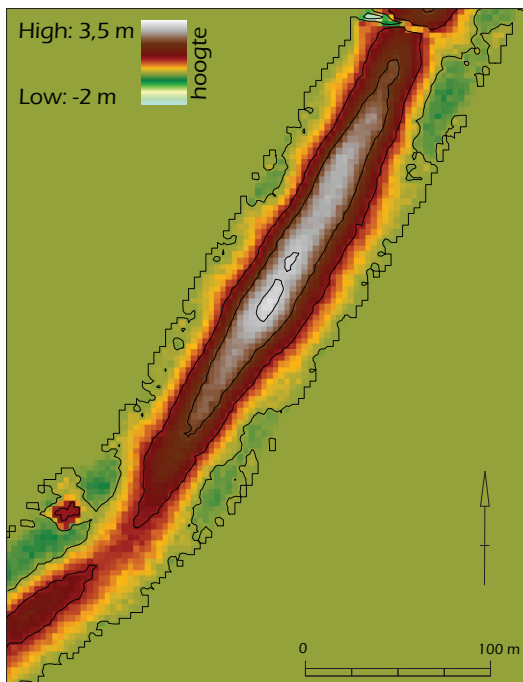


FIG. 10 Het DHM van het aquaduct in zone D.  
The DTM of the aqueduct in area D.



FIG. 11 Zone E gefotografeerd vanuit het noorden, vanop de ruilverkavelingsweg, staande op de kam van het aquaduct (© VIOE).  
Area E photographed from the north, standing on the crest of the aqueduct.

<sup>23</sup> Sengers 1935a, 1935b & 1935c; Ponzetta et al. 2002, 8.



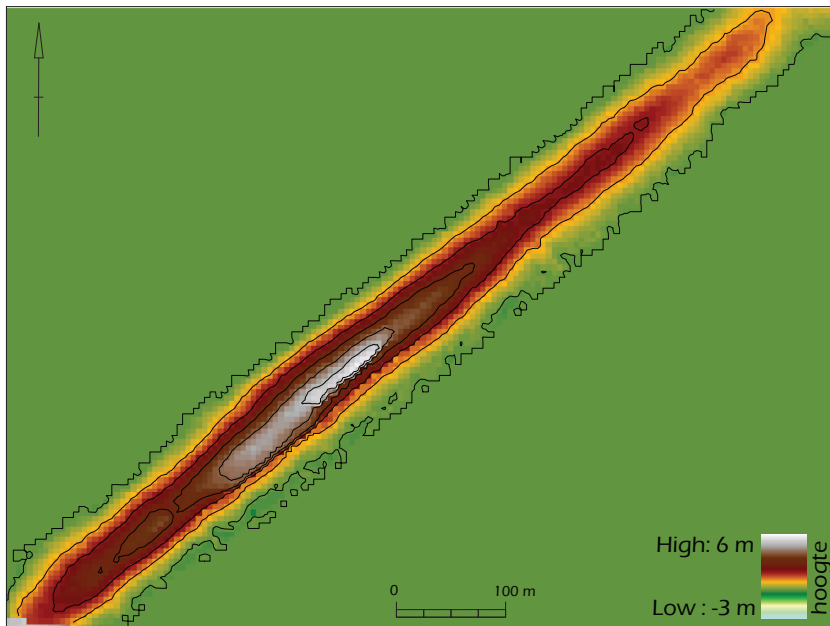


FIG. 12 Het DHM van het aquaduct in zone E.  
The DHM of the aqueduct in area E.

b). De best bewaarde delen zijn deze die niet in akkerland zijn gelegen: in zone C in de boomgaard, en in zone E gedeeltelijk als een houtkant.

### 3.3.3 Het totale volume van het aquaduct

Het totale volume van de bewaarde wal werd berekend op ca. 817 000 m<sup>3</sup> (cf. supra). Hierbij moet nog het volume gerekend worden van het gedeelte dat weggegraven werd bij de aanleg van het PIBO. Voor een inschatting van dit oorspronkelijke volume hebben we het gemiddelde volume per 100 m van de zones B en C genomen, vermenigvuldigd met 2,5 (het weggegraven gedeelte was ca. 250 m in lengte), wat een volume van 56 450 m<sup>3</sup> oplevert. Het totale volume (zonder hierbij het reeds door erosie weggevoerde materiaal in rekening te brengen, cf. infra), kan hierdoor geschat worden op ca. 873 000 m<sup>3</sup>. Momenteel is niet duidelijk waar dit enorme volume aan aarde vandaan kwam. Het DHM lijkt aan weerszijden van de zones C en D depressies te vertonen, die kunnen suggereren dat de aarde ter plaatse werd afgegraven en opgegooid (fig. 1). Dergelijke depressies kunnen we echter niet vaststellen aan weerszijden van de *Beukenberg*. De juiste herkomst van de opgeworpen aarde, en daarmee de constructiewijze van de aarden wal, is dus vooralsnog niet duidelijk.

### 3.3.4 Een hypothetische reconstructie van het aquaduct

De best bewaarde gedeelten van het aquaduct op de *Beukenberg* hebben een hellingsgraad tot 30°. We kunnen dit cijfer dan ook als een constante aannemen die het meest de morfologie van het oorspronkelijke heuvellichaam benadert. Naar wat nodig was om het gewenste verval te bekomen (cf. infra 3.3.5) zullen de breedte van de voet en de hoogte van de wal wel variabel geweest

zijn. Indien we een hellingsgraad van 30° nemen als de norm voor het oorspronkelijke heuvellichaam, is het mogelijk een hypothetische reconstructie te maken van de oorspronkelijke diktes en breedtes van het aquaduct voor zones C en D (voor zone E werd omwille van diens huidige onregelmatige vorm een dergelijke reconstructie niet gemaakt). Dit kan door de profielen van de best bewaarde delen van deze zones (cf. 3.3.2) op te trekken tot een profiel met dezelfde oppervlakte, maar met een hellingsgraad van de wanden van 30°. Deze gereconstrueerde waarden worden weergegeven in tabel 2.

### 3.3.5 Het verval van het aquaduct

ARON berekende, met het *Hoogveld* als begin van het gekende deel van het aquaduct en het hoogst bewaarde gedeelte van de *Beukenberg* als eindpunt, een gemiddeld verval van 1,3%<sup>24</sup>. Door alle puntmetingen van het DHMV over de kam van het aquaduct te gebruiken en hetzelfde begin- en eindpunt te gebruiken, wordt dit cijfer bevestigd.

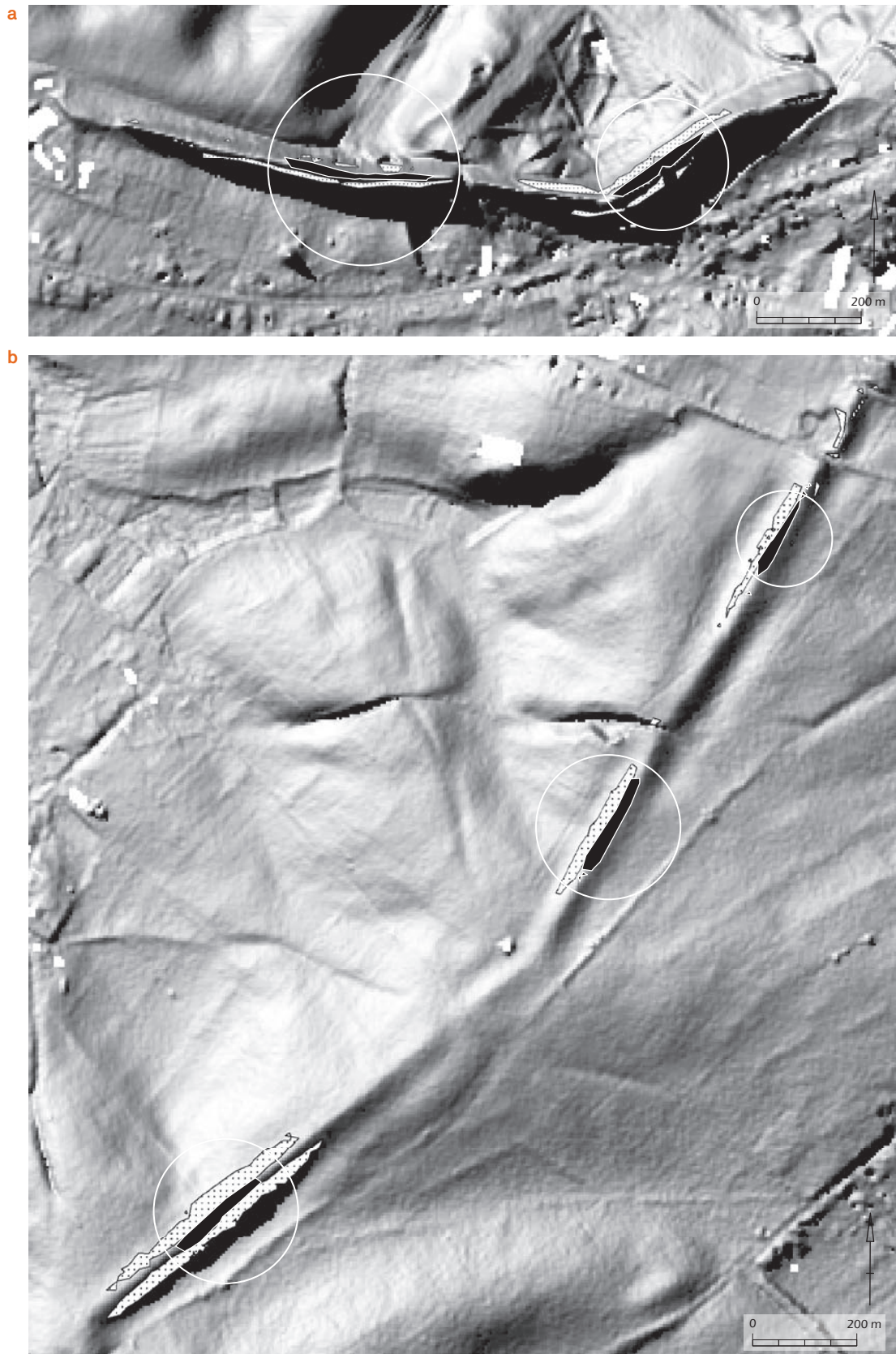
In 1998 werden in het kader van de aanleg van de aardgasleiding Zeebrugge-Raeren sporen aangetroffen die mogelijk tot het aquaduct<sup>25</sup> behoren (fig. 14): 2 parallelle greppels, NO-ZW georiënteerd, gevuld met harde, brokkelige klei, ongeveer 20 cm diep bewaard, 0,5 tot 1,2 m breed, en ca. 3 m uit elkaar gelegen. Het aquaduct nam potentieel in deze zone dus de vorm aan van een greppel- of grachtconstructie, of ingegraven leiding, die verder de waterscheidingskam tussen Maas-en Scheldebekken volgde (cf. stippellijn op fig. 14)<sup>26</sup>. Deze site is ongeveer op 112 m TAW<sup>27</sup> gelegen. Indien dit effectief een deel van het aquaduct is en we nemen het hoogst bewaarde gedeelte van de *Beukenberg* nog steeds als referentie voor het eindpunt van het aquaduct, dan heeft het aquaduct over deze lengte een gemiddeld verval van 0,57‰.

<sup>24</sup> Ponzetta *et al.*, 28. Het rapport bespreekt daarbij gedetailleerd het verval van het aquaduct van zone tot zone.

<sup>25</sup> Vindplaats D47, CAI 701521: In 't Ven *et al.* 2005.

<sup>26</sup> Cf. ook Ponzetta *et al.* 2002, 6-7; Sengers 1935 a-c.

<sup>27</sup> Tweede Algemene Waterpassing.



**FIG. 13** Op basis van de bewaarde hoogte van het aquaduct (hoogste waarden per zone in zwart aangeduid), en de hellingsgraad (hoogste waarden per zone als gestippeld gemarkeerd), kunnen relatief per zone de best bewaarde zones geïdentificeerd worden. a: zones A&B. b: zones C-E.  
*Based on the height (highest values per zone indicated in black) and slope (highest values per zone indicated as dotted areas) of the aqueduct, it was possible to identify the best preserved areas per zone. a: zones A&B. b: zones C-E.*

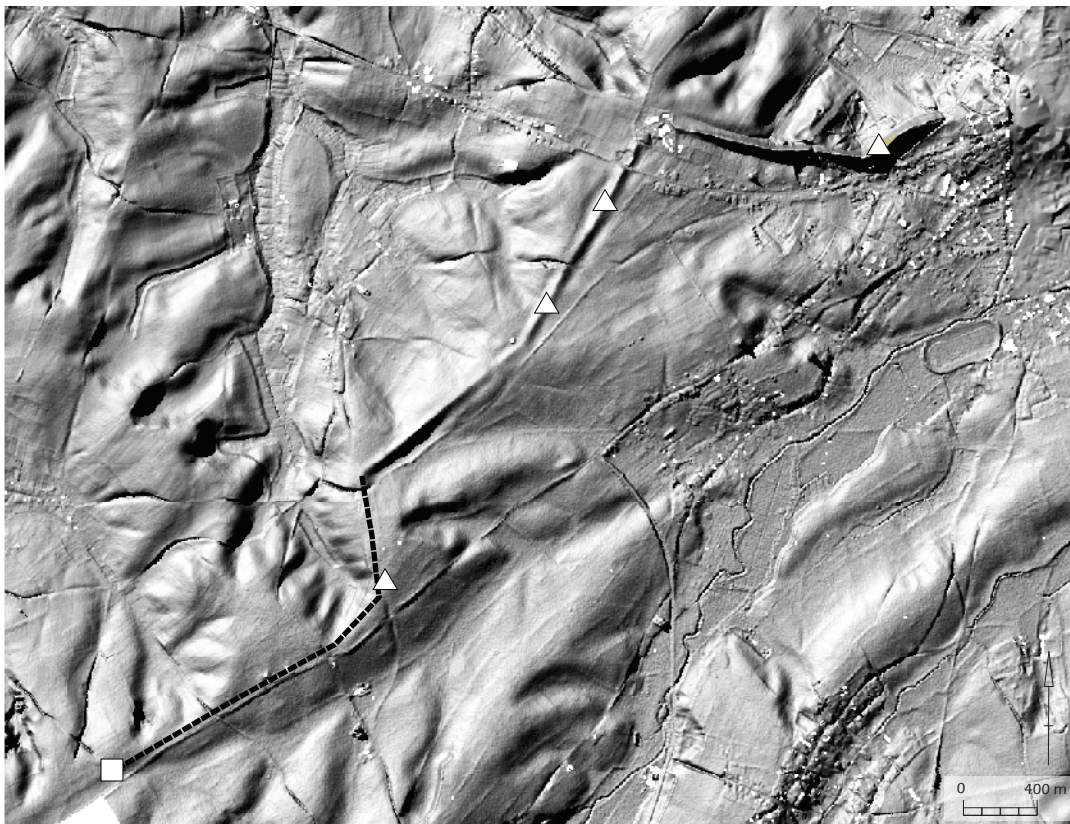
Door de gereconstrueerde hoogtes van zones C en D als referentie te gebruiken (cf. 3.3.4, tabel 2 & fig. 14) krijgen we de volgende cijfers. Tussen zone D en het hoogste deel van de *Beukenberg*: 1,4‰. Tussen zone C en hetzelfde punt: 1,7‰. Het hoogteverschil tussen de site op de aardgasleiding en de gereconstrueerde hoogtes TAW van zones C en D, is zo goed als onbestaande. Vanaf deze site moet de waterleiding het hoger gelegen plateau van het *Hoogveld* gepasseerd zijn waarbij, indien de westelijke rand van dit plateau gevolgd wordt (het traject weergegeven door de stippellijn op fig. 14), een hoogte van 115 m TAW moest overwon-

nen worden. Een mogelijke oplossing hiervoor zou het gebruik van een drukleiding zijn. Van dit punt op het plateau zou het verval tot zone D 1,5‰ bedragen hebben, en 1,3‰ tot zone C (met gebruik van de gereconstrueerde hoogtes). De vergelijkbare cijfers, schommelend rond de 1,5‰, die verkregen worden met het gebruik van de gereconstrueerde hoogtes van zones C en D, doen enerzijds vermoeden dat deze reconstructie als vrij betrouwbaar kan beschouwd worden. Anderzijds doet dit gelijkmatige verval vermoeden dat de interpretatie van dit monument als aquaduct eveneens zeer waarschijnlijk de juiste is.

**TABEL 2**

Gereconstrueerde waarden van hoogte en breedte aan de voet van zones C & D, op basis van een hellingsgraad van 30°. *Reconstructed values for height and width for areas C and D, based on a 30° slope for the sides of the aqueduct.*

	huidige max. hoogte	huidige hoogte TAW	hoogte met helling= 30°	hoogte TAW met helling= 30°	Breedte voet met helling= 30°
<b>Zone C</b>	4,1 m	107,9 m	8,0 m	111,8 m	27,6 m
<b>Zone D</b>	3,0 m	108,7 m	6,4 m	112,1 m	22,0 m



**FIG. 14** Hillshade model van het DHMV, met aanduiding van de hoogste punten van het aquaduct in zones A, C, D en op het *Hoogveld* (driehoeken), de site aangetroffen bij de aanleg van de aardgasleiding (vierkant), en het hypothetische verloop van het aquaduct (stippellijn).

*Hillshade model of the DTM, indicating of the highest points of the aqueduct in areas A, C and D (triangles), the site found during the construction of a pipeline (square), and the hypothetical course of the aqueduct (dashed line).*

## 4 De erosie van het aquaduct in het akkerland

### 4.1 De ruilverkaveling *Widooie*: het einde van het aquaduct als structuurbepalend element

Op historische kaarten zoals deze van het *Dépot de la Guerre*<sup>28</sup> is duidelijk te zien hoe de kam van zones C tot E van het aquaduct de administratieve afbakening vormt tussen de prefusiegemeenten *Koninksem* en *Widooie*. Ook op recentere bronnen, bijvoorbeeld de kadasterkaarten van begin jaren 1990, is het aquaduct structuurbepalend voor het perceelspatroon. In de landschapsstudie die aan de ruilverkaveling *Widooie* voorafging, wordt dan ook enkele malen melding gemaakt van het aquaduct<sup>29</sup>. In de synthese van deze studie<sup>30</sup> werden de cultuurhistorische elementen echter enkel "...als ze relevant zijn, betrokken bij het opstellen van het einddocument"<sup>31</sup>. Van het aquaduct is hier geen spoor meer, in tegenstelling tot enkele Romeinse *tumuli* die wel nog worden vermeld. In het milieueffectenrapport *Secundaire wegenwerken en kavelinrichtingswerken Widooie* (1991) worden deze *tumuli* eveneens nog vermeld als cultuurhistorische elementen. Van het aquaduct wordt enkel de *Beukenberg* nog kort aangehaald (p. 13), het zuidelijke tracé is op elk plan verdwenen. Het wordt wel nog kort aangehaald als een "te vermelden zichtbaar relict" (p. 14).

Met de uitvoering van de ruilverkaveling *Widooie* werd het structuurbepalende karakter van de zones C, D en E sterk aangetast. Er werden grote gebruikspcelen over het aquaduct heen

gelegd, en er werden twee ruilverkavelingswegen dwars over de rug aangelegd. Sindsdien wordt dus voor grote delen dwars over het aquaduct heen geploegd. Deze bewerkingserosie heeft een grote impact op de bewaringstoestand van het monument (*cf. infra*).

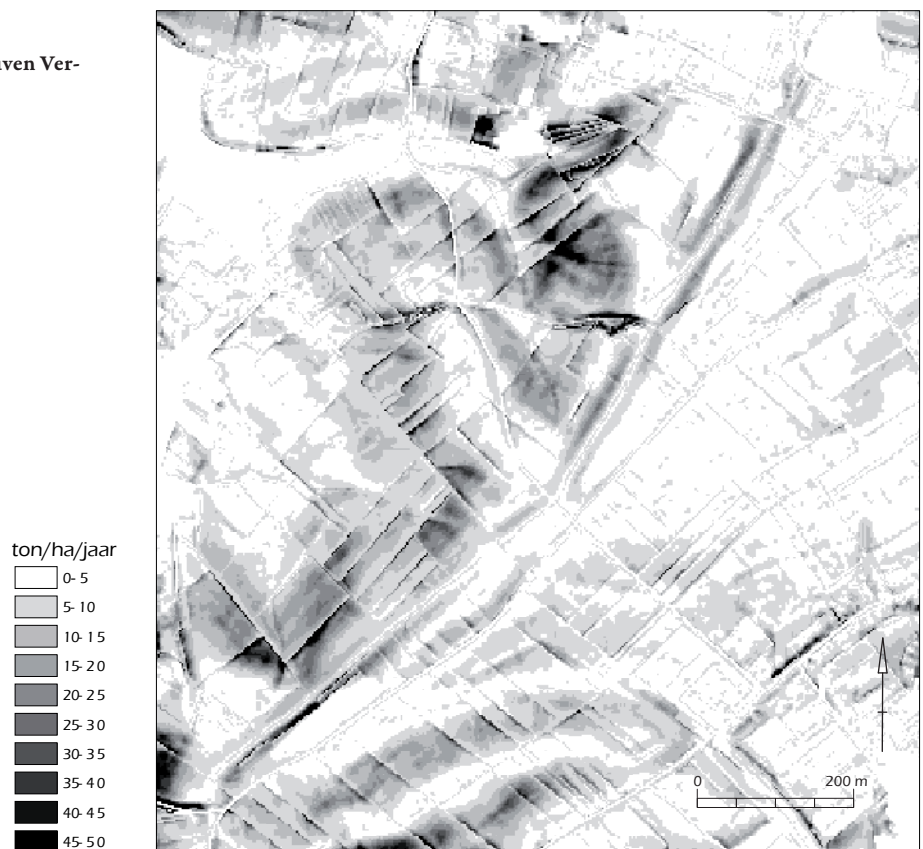
### 4.2 Erosiemodellering

Voor het in kaart brengen van de erosie in de zone van het zuidelijke tracé van het aquaduct werden water- en bewerkingserosiemodelleringen, ontwikkeld door de K.U.Leuven, gebruikt en gecombineerd.

Het watererosiemodel (fig. 15) is een aangepaste versie van de *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE2)<sup>32</sup>. Het houdt rekening met perceelspatronen en met het effect van perceelsgrenzen op de connectiviteit van afstromend water.

Het erosiemodel voorspelt erosiewaarden, uitgedrukt in ton/ha/jaar, maar deze waarden dienen eerder relatief en niet absoluut gebruikt te worden, omdat dit sterk afhankelijk is van de resolutie van het gebruikte DHM. De modellering toont vooral hoge erosiewaarden op de hellingen van het aquaduct. De westelijke helling van het aquaduct, die steiler is en aansluit bij een aantal droge dalen naar de vallei van de Molenbeek, heeft hogere erosiewaarden dan de oostelijke helling, die aansluit bij vlakker terrein.

**FIG. 15** Het watererosiemodel, © K.U.Leuven Verijnde erosiekaart Vlaanderen. *Water erosion model.*



<sup>28</sup> Kaartblad 33/8 *Looz*, omstreeks 1865.

<sup>29</sup> Bertens *et al. s.d.*, 30 & fig. 5.

<sup>30</sup> *Ibid.*, 143-156.

<sup>31</sup> *Ibid.*, 143.

<sup>32</sup> Notebaert *et al.* 2006, 14.

Op de rug van het aquaduct, waar het reliëf vlakker is en zonder bovenliggende helling (dus zonder zogenaamde *upslope contributing area*), voorspelt het model nagenoeg geen erosie.

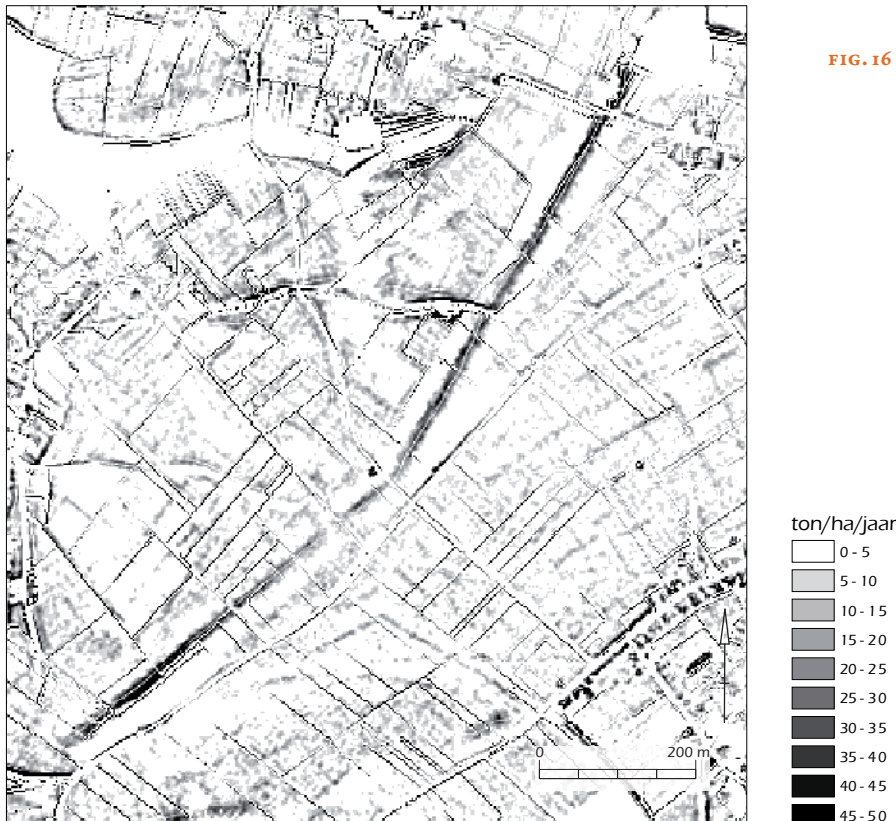
Omdat dit erosiemodel niet het huidige landgebruik als uitgangspunt neemt maar heel het gebied als akkerland modelleert, werd eveneens een *RUSLE*-modellering uitgevoerd waarbij ook het huidige landgebruik mee in rekening werd gebracht<sup>33</sup>. Hierbij tonen de zones onder fruitboomgaard en grasland, ook op de hellingen van het aquaduct, een zeer geringe voorspelde erosie (<0,1 ton/ha/jaar). De zones onder akkerland tonen erosiewaarden tot 5 ton/ha/jaar. Ook deze waarden moeten als relatieve en niet als absolute maatstaven geïnterpreteerd worden.

Het bewerkingserosiemodel zoals opgesteld door de K.U.Leuven<sup>34</sup> (fig. 16) geeft de potentiële netto sedimentexport door bewerkingserosie per rastercel weer, in de richting van de steilste helling. Dit komt in het geval van het aquaduct overeen met de werkelijke ploegrichting. Waar het model een 0-waarde voorspelt, kan er in principe dus geen netto-erosie voorkomen, wel sedimentatie. Heel het gebied wordt als akkerland beschouwd. In tegenstelling tot het watererosiemodel blijft de gemodelleerde connectiviteit van afstromend water beperkt tot de percelen zelf, met andere woorden, er wordt geen connectiviteit tussen de percelen gemodelleerd zoals in het watererosiemodel. De grootste erosiewaarden in dit model komen grotendeels voor op de perceelsscheidingen, wat echter gedeeltelijk als een artefact van de modellering moet beschouwd worden.

Wat het aquaduct betreft, worden er hoge waarden voorspeld op de rug van het aquaduct. Dit kan verklaard worden door het feit dat hier geen sedimentatie plaatsvindt, enkel erosie. Het zijn immers convexe landschapsvormen en net daar is bewerkingserosie steeds het grootst, terwijl er geen zone hellingopwaarts is waarvan sediment kan komen. Op de hellingen van het aquaduct geeft het model weinig of geen netto-erosie aan omdat dit eerder lineaire (in tegenstelling tot concave of convexe) hellingen zijn.

De combinatie van water- en bewerkingserosiemodellen (fig. 17) voorspelt de totale netto-erosie in het gebied. Dit model vertoont voornamelijk de grootste overeenkomsten met het bewerkingserosiemodel, waarvan de absolute erosiewaarden overheersen binnen de perimeter van het aquaduct. De voorspelde erosie op de kam is in dit model overal 2 tot 4 maal zo hoog als op de flanken.

Op basis van luchtfoto's kan eveneens een inschatting gemaakt worden van de zones waar het oorspronkelijke heuvellichaam en de omgeving van het aquaduct momenteel door erosie wordt aangetast, althans voor de zones C tot E. Op deze foto's zijn deze duidelijk zichtbaar als lichtere stroken (fig. 8). Om deze zones af te bakenen werd een *maximum likelihood classification* (mlc) uitgevoerd<sup>35</sup> (fig. 18). Het patroon dat hierdoor herkend kan worden vertoont zeer veel gelijkenissen met het bewerkingserosie- en het gecumuleerde erosiemodel.



**FIG. 16** Het bewerkingserosiemodel, © K.U.Leuven Verfijnde erosiekaart Vlaanderen. *Tillage erosion model.*

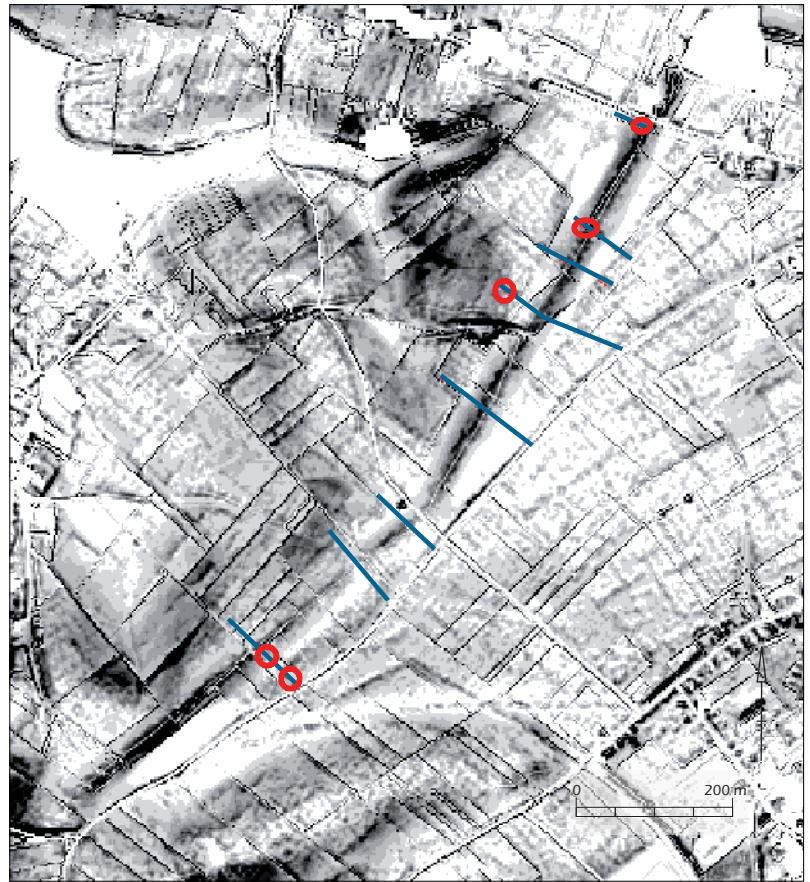
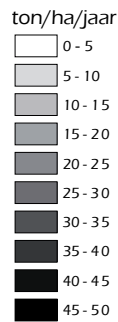
<sup>33</sup> Meylemans & Van Laecke 2006.

<sup>34</sup> Notebaert *et al.* 2006, 43-48.

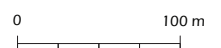
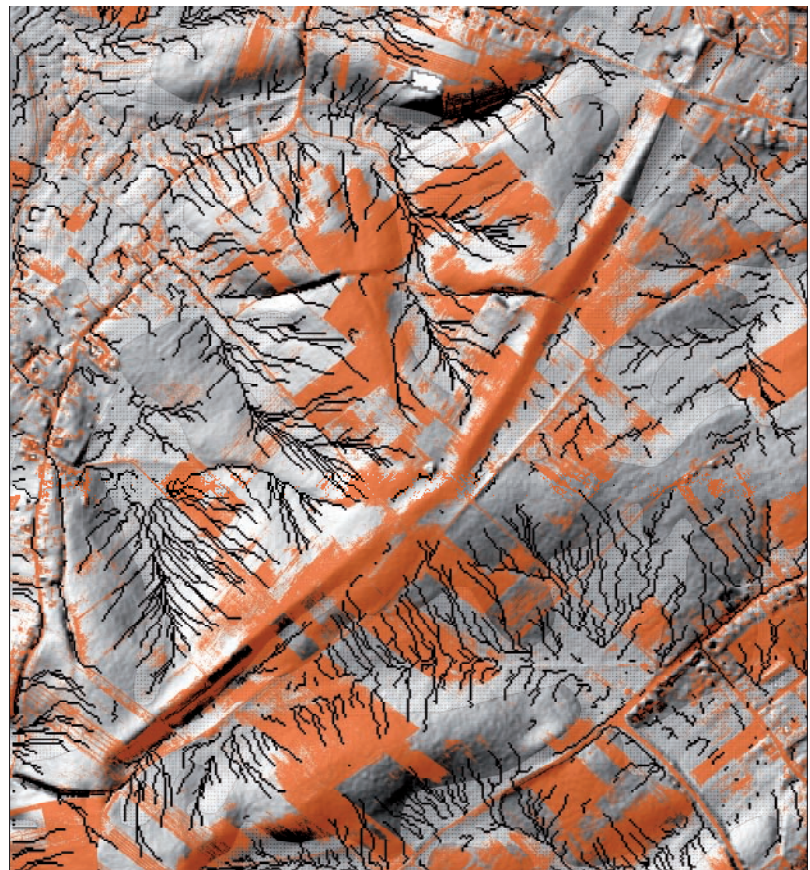
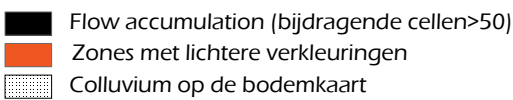
<sup>35</sup> Dit clustert de kleurwaarden van het beeld in verschillende 'klassen', afhankelijk van het land-

gebruik, de bodemtextuur *etc.* Deze kleurwaarden worden zo omgezet naar een nieuw raster.

**FIG. 17** Het gecumuleerde erosiemodel, met de opgemeten transecten (blauwe lijnen), en aanduiding van de zones waar de verschilwaarden tussen het DHMV en de metingen een trend van erosie aanduiden (rood omcirkeld).  
*Cumulated erosion model, with topographical measurements from 2006 (blue lines) and indication of the areas where the differences in height between DTM and new measurements indicate a trend of 'flattening' (circled in red).*



**FIG. 18** Flow accumulation-patternen, colluvium op de bodemkaart en aanduiding van zones met lichtere verkleuringen op basis van mlc-analyse.  
*Flow accumulation patterns, colluvium on the soil map, and indication of zones with lighter colourations based on mlc-analysis.*



### 4.3 De opmeting van enkele transecten: de aanzet van een *monitoring*-strategie

Oorspronkelijk was het onze bedoeling de in 2002 door ARON opgemeten transecten opnieuw op te meten om de verschillen tussen beide te kunnen evalueren. De metingen van ARON bleken er echter te veel te verschillen met het DHMV dat ongeveer in dezelfde periode opgemaakt werd. Bij navraag bleek er inderdaad, als gevolg van de gebruikte methode (GPS), een grote foutenmarge te zijn in de hoogtemetingen<sup>36</sup> van ARON. Voor de *monitoring* van de erosie bleken deze metingen dus niet bruikbaar. Gespreid over het zuidelijke tracé werden daarom 8 nieuwe transecten opgemeten met *total station* (op 3 april 2006). In totaal werden (buiten de referentiepunten) 292 meetpunten, om de vijf meter op elk transect, geregistreerd (fig. 17). Deze metingen kunnen als ijkwaarden worden gebruikt voor de verdere opvolging van de snelheid van erosie van het monument<sup>37</sup>.

### 4.4 Een vergelijking van de metingen met het DHMV

Op basis van de nieuwe transectmetingen en het DHMV werd bekeken of er effectief vervlakking van het aarden monument kon vastgesteld worden, en of dit in relatie kan gebracht worden met het gecumuleerde erosiemodel. Hiertoe werden de metingen gerasterd op dezelfde resolutie als die van het DHMV (cellen van 5 bij 5 meter). Beide rasters werden vervolgens van elkaar afgetrokken. Dit leverde een nieuw raster op met de verschilwaarden tussen beide metingen. Omwille van de gemiddelde standaardafwijkingen van het DHMV (waarbij een precisie van 7 cm wordt gegarandeerd op kort gras en kaal akkerland), en de aard van onze eigen metingen (in lineaire transecten om de 5 meter en beïnvloed door microtopografie ten gevolge van beakkering), werd enkel rekening gehouden met zones waar over aanzienlijke lengtes eenduidige verschilwaarden konden vastgesteld worden. Dit toont op deze opgemeten transecten 5 zones aan waar de verschilwaarden mogelijk wijzen op een trend van vervlakking (fig. 17). De verschilwaarden tussen beide rasters geven hier negatieve waarden aan tot 25 cm. Deze cijfers kunnen echter niet beschouwd worden als een absolute maatstaf van de afvlakking van het monument. Ze geven enkel een mogelijke trend weer. Drie van de vijf zones zijn gelegen op het aquaduct zelf, telkens op de bovenhelling en gedeeltelijk de kam, waar het gecumuleerde erosiemodel sterke erosie voorspelt.

Ten slotte zijn er ook zones waarin de verschilwaarden een stijging van het oppervlak aanduiden (dit wijst mogelijk op sedimentatie). De rechtstreekse vergelijking met de erosiemodellen kan hier moeilijk gemaakt worden, omdat deze geen sedimentatie voorspellen. Het is echter wel opvallend dat deze zones enerzijds allemaal in delen van het aquaduct gelegen zijn waar weinig erosie wordt voorspeld en anderzijds dat deze zones dikwijls op de benedenhelling en aan de concave voet van de helling van het aquaduct gelegen zijn. Dit kan wijzen op sedimentatie ten gevolge van bewerkingserosie.

Door de verschillende aard en precisie van de meetgegevens kunnen we enerzijds aan de hand van deze verschilwaarden niet met zekerheid stellen dat we een duidelijke trend van vervlakking van het aquaduct tussen 2002 en 2006 meetbaar kunnen

vaststellen. Anderzijds blijkt er toch een correlatie te zijn tussen deze verschilwaarden en het gecumuleerde erosiemodel. Het geregeld opnieuw opmeten van deze transecten, of een nieuwe *lidar*-opname van het aquaduct, kan in de toekomst meer duidelijkheid scheppen over de snelheid van erosie.

### 4.5 De modellering van afvloeiingspatronen

In de bovenstaande modellering wordt geen sedimentatie voorspeld. Het merendeel van het sediment komende van het aquaduct kan verwacht worden aan de concave voet van de helling of wordt, waar er connectiviteit is, afgevoerd naar de droge dalen ten westen<sup>38</sup>.

Om een inschatting te maken van de sedimentatiepatronen in het gebied werden via de *flow accumulation*-functie van ArcGIS' *Spatial Analyst* en op basis van het DHMV de afvloeiingspatronen gemodelleerd (fig. 18). Dit laat toe de connectiviteit in kaart te brengen tussen het aquaduct en de droge dalen aan de westkant van de waterscheidingskam. De hoge *flow accumulation*-waarden zijn daarbij telkens te situeren in de thalweg van de droge valleien en tonen waar er sediment komende van het aquaduct kan worden afgevoerd en afgezet. Op de bodemkaart staan deze zones inderdaad overwegend als *colluvium* aangeduid.

Er kunnen verschillende zones met een sterke connectiviteit met het aquaduct worden aangeduid: in zone C net boven de holle weg; in het centrum van zone D; in het centrum en het uiterste westen en oosten van zone E. Op een aantal plaatsen wordt een afvloeiingspatroon parallel met het aquaduct gemodelleerd, bijvoorbeeld aan de noordkant van zone C. Ook dit patroon stemt overeen met op de bodemkaart gekarteerd *colluvium*. Dit is eveneens in relatie te brengen met de donkere sporen die op luchtfoto's het aquaduct flankeren en die al door W. Vanvinckenroye in verband werden gebracht met afstromend water (*cf. supra*).

### 4.6 Bespreking en vergelijking van de modellen en van de bewaringstoestand van het aquaduct

Er werd gekeken of er verbanden kunnen worden gelegd worden met de erosiemodelleringen, de gemodelleerde afvloeiingspatronen, en de blekere verkleuringen op de luchtfoto's (*cf.* 3.1, fig. 8 & fig. 18).

Dit laatste beeld toont een zeer grote correlatie met het bewerkingserosiemodel (fig. 16). Er is eveneens een sterke relatie tussen *colluvium* op de bodemkaart en concentraties aan afvloeiingspatronen op de *flow accumulation*-modellering.

Een opvallende correlatie tussen de modellen en de bewaringstoestand van het aquaduct is gesitueerd op de noordhelling van het gedeelte aansluitend bij de holle weg van zone C. Daar maken de *flow accumulation*-patronen een directe verbinding tussen sterk eroderende zones op de bewerkingserosiemodellering, die hier zeer sterk bevestigd wordt door de bleke verkleuringen op luchtfoto, en de droge valleien ten westen. In deze zone heeft het aquaduct op de noordwestelijke helling de kleinste hellingsgraad, niet te onderscheiden van de natuurlijke helling. De huidige bewaring van het monument kan hier dus in relatie gebracht worden met de connectiviteit van afstromend water met het dal ten westen.

<sup>36</sup> Informatie E. Wesemael, ARON bvba. Het verschil tussen deze metingen en het DHMV bedraagt

tot 0,9 m.

<sup>37</sup> Deze meetpunten zijn integraal opgenomen in

Meylemans & Van Laecke 2006.

<sup>38</sup> Verstraeten *et al.* 2006 p. 399.

Op basis van de bovenstaande modelleringen, metingen, en vergelijking met bodemkaart en luchtfoto's, blijkt dat de erosie van het aquaduct kan vastgesteld en in kaart gebracht worden. Het huidige patroon van vervlakking van het aquaduct lijkt het best te correleren met het gecumuleerde erosiemodel, waarbij bewerkingserosie de meest dominante vorm van erosie is in het gebied. Dit wordt vooral duidelijk gemaakt door de relatie tussen het bewerkingserosiemodel en erosiepatronen vaststelbaar via luchtfoto's.

Bij de interpretatie van de erosiemodelleringen moet ten slotte rekening gehouden worden met de tijdsfactor en met het tijdstip waarop de gebruikte instrumenten zijn aangemaakt. Op basis van onderzoek naar erosiepatronen in de Belgische leemstreek werd recent immers een verschuiving vastgesteld in het belang van water- en winderosie enerzijds, en bewerkingserosie anderzijds<sup>39</sup>. Tot de jaren 50, vóór de uitgebreide mechanisatie van de landbouw, was wind- en watererosie overwegend van belang. De laatste decennia is bewerkingserosie echter de belangrijkste factor geworden is. In het algemeen kan vastgesteld worden dat *colluvium* afkomstig van bewerkingserosie hoger op de hellingen en in concave landschapsposities wordt afgezet. De huidige bodemkaart, daterend van de jaren 70, geeft deze trend en dus dit recente *colluvium* niet geheel correct weer, ook al omdat sindsdien het perceelspatroon ingrijpend is gewijzigd. In die zin kan gesteld worden dat enerzijds het watererosiemodel, de bodemkaart en het *flow accumulation*-model een algemene trend op langere termijn van erosie en depositie aanduiden, en dat anderzijds het bewerkingserosiemodel samen met de verkleuringen zichtbaar op recente luchtfoto's de sterke dominantie van de huidige bedreiging door bewerkingserosie weergeven.

#### 4.7 Beheer van het aquaduct

Het is duidelijk dat de herstructurering van het landschap door de ruilverkaveling *Widooie* begin jaren 90 een grote negatieve impact heeft op de bewaring van het Romeinse aquaduct van Tongeren. De toename van bewerkingserosie is hierbij de belangrijkste factor. Het ideale scenario voor het beheer van dit gedeelte van het aquaduct is dan ook een herverkaveling van de percelen waarop het aquaduct is gelegen, en het uit akkerland nemen van het monument. Het omzetten naar grasland of fruitboomgaard van deze strook biedt daarbij nagenoeg de enige mogelijkheid om het monument van verdere erosie te behoeden. Een dergelijke ingreep biedt bovendien de mogelijkheden het aquaduct visueel in het landschap te accentueren. Met de *Beukenberg*, verschillende tumuli, tracés van vroegere Romeinse wegen, en de Romeinse restanten in het centrum van Tongeren in de directe nabijheid zou op die manier de kans bestaan in wandelbereik een zeer waardevolle toeristische ontsluiting van het Romeinse Tongeren te verwezenlijken.

Momenteel zijn we hier echter nog zeer ver van af. Zones C tot E van het aquaduct zijn immers gelegen op 38 verschillende gebruikspcelen, die in gebruik zijn door 20 verschillende landbouwers. Hiervan is, naar de perceelsregistratie van 2007, meer dan 75% (van de ca. 20 ha die zones C tot E omvatten) akkerland, ca. 8% (1,64 ha) was in 2007 in gebruik als laagstam-fruitteelt, de rest als tijdelijk grasland.

Een aangepast beheer, als we een eventuele ingrijpende maatregel als verwerving van de gronden van overheidswege niet meetellen, vereist dan ook de *goodwill* van al deze verschillende gebruikers om het aquaduct 'als een goede huisvader' te beheeren. Een bescherming als archeologisch monument, waarvan de procedure opgestart is, kan immers de gangbare bedrijfsvoering niet verhinderen. Door de huidige perceelsstructuur betekent het omzetten naar bijvoorbeeld grasland echter enerzijds het uit akkerland nemen van een aanzienlijk deel van deze zeer vruchtbare gronden, anderzijds betekent het dat de meeste gebruikspcelen 'doormidden' gesneden worden, waardoor de bedrijfsvoering uiteraard sterk bemoeilijkt wordt. De enige mogelijkheid om dit momenteel toch te verwezenlijken lijkt te bestaan in het afsluiten van beheersovereenkomsten met de gebruikers van deze percelen. Deze piste wordt momenteel onderzocht door de Vlaamse Landmaatschappij (VLM), in opdracht van het Agentschap Ruimtelijke Ordening.

## 5 Samenvatting en besluit

Een aantal relatief nieuwe instrumenten, het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen en afgeleide modelleringen, werd uitgetest om het Romeinse aquaduct van Tongeren te meten en de bewaring ervan te evalueren. Daartoe werd het aquaduct opgedeeld in 5 zones die worden gescheiden door subrecente verstoringsen.

Hieruit blijken de grote mogelijkheden van deze instrumenten. In de eerste plaats was het mogelijk enkele absolute cijfers te verzamelen over de dimensies van het aquaduct. Daarbij komt vooral het monumentale karakter van het aquaduct tot uiting (tot 14 m hoogte met een totaalvolume van ca. 800 000 m<sup>3</sup> aarde).

Door de hellingsgraad en de bewaarde hoogte van het opgeworpen pakket aarde als maatstaven te nemen, konden vervolgens per zone de best bewaarde en dus meest representatieve delen van het aquaduct herkend worden.

Daarnaast werd een aantal hypothetische reconstructies van het aquaduct gemaakt, op basis van de transecten van de best bewaarde zones, en met een oorspronkelijke helling van 30° van de flanken als maatstaf. Deze reconstructie simuleert een vrij gelijkmatig verval van het aquaduct van het *Hoogveld* te *Widooie* tot aan het hoogste punt van de *Beukenberg*.

Daarnaast werd getracht de huidige erosie van het in akkerland gelegen aquaduct (zones C-D-E) in kaart te brengen. Daartoe werd gebruikgemaakt van water- en bewerkingserosiemodellen, van een aantal nieuwe transectmetingen (in april 2006), van kleurenorthofoto's, de bodemkaart en een *flow accumulation*-modellering. Er is een trend van vervlakking vast te stellen tussen de DHMV-opname van 2002 en transectmetingen met *total station* in 2006, die kan gerelateerd worden aan patronen zichtbaar op het gecumuleerde erosiemodel. Verder zijn er duidelijke verbanden te bemerken tussen:

- de gemodelleerde bewerkingserosie en zones met blekere verkleuringen zichtbaar op luchtfoto's;
- de gemodelleerde afvloeiingspatronen en donkere lineaire sporen zichtbaar op luchtfoto's;
- de aanwezigheid van *colluvium* op de bodemkaart en gemodelleerde afvloeiingspatronen.



Er is ten slotte een duidelijk vast te stellen relatie tussen de huidige bewaringstoestand van het monument en de gemodelleerde erosie-impact.

Met deze resultaten blijkt nogmaals de waarde van nieuwe digitale instrumenten als het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen en erosiemodelleringsen voor archeologische toepassingen, en niet alleen voor de detectie van archeologische of paleolandschappelijke elementen, maar eveneens voor de evaluatie van bewaringstoestand en bedreiging van het archeologisch erfgoed.

Een groot deel van een van de grootste aarden monumenten van Vlaanderen, tevens wellicht het meest representatieve Romeinse aquaduct van zijn type in Noordwest-Europa, wordt momenteel sterk aangetast, voornamelijk door bewerkingserosie. Het stoppen of minimaliseren van deze erosie op het monument vereist dringende maatregelen, en omvat idealiter een herverkaveling van het gebied, waarbij de perceelsstructuur van vóór de ruilverkaveling *Widooie* (begin jaren 90) wordt hersteld. Het aquaduct zou in hetzelfde ideale scenario uit akkerland kunnen worden genomen, en als een strook grasland worden ingericht. Dit zou het aquaduct als een duidelijk visueel baken in het landschap accentueren, wat in combinatie met de vele andere Romeinse relicten in de buurt uitgelezen mogelijkheden zou scheppen naar de ontwikkeling van een toeristische en educatieve ontsluiting. Dit is echter een zeer moeilijke opdracht, gezien de huidige versnippering van de eigendomsstructuur van het aquaduct. Een belangrijke eerste stap naar een beter beheer van het monument lijkt dan ook te berusten in eventuele mogelijkheden voor het afsluiten van beheerovereenkomsten met deze eigenaars en gebruikers.

## Summary

### **An analysis of the morphology and preservation of a part of the Roman Aqueduct of Tongeren (prov. of Limburg) using Lidar measurements and erosion modelling**

Between 2000 and 2004 the Flemish government ordered the creation of the so-called 'DTM-Flanders', mainly to support Flanders flood prevention policy. The DTM, based on lidar data, is available for the whole of Flanders, with a resolution of one measure point per 20 m<sup>2</sup>. This article discusses the use of this instrument and a number of derivative products (water-, tillage- and combined erosion models, flow accumulation modelling), combined with other geodata (aerial photographs, soil map) and earlier archaeological observations, for the evaluation of the preservation of the Roman aqueduct of Tongeren.

Earlier research<sup>40</sup> focused on the appearance of the monument, primarily using GPS measurements. The DTM, however, allows a much more detailed recording of the dimensions of the aqueduct (height, width, volume, and slope). The total volume of earth in the aqueduct, a large linear earthwork of slightly more than 4 km in length (the known part), is estimated to be more than 800.000 m<sup>3</sup>, with heights up to 14 m.

Based on these measurements and by defining threshold values it was possible to construct a preservation model for the aqueduct and to identify the best preserved parts. This allowed a partial and hypothetical reconstruction of the aqueduct's original appearance (width and height) in areas where it is situated in arable land.

In addition to these measurements we tried to define the impact current erosion has on this part of the aqueduct. In order to do this the erosion models developed by the K.U.Leuven were analysed and compared with a flow accumulation model, new topographical measurements and recent aerial photographs. This shows us that a trend towards a 'flattening' of the monument can be observed, which corresponds best with the cumulated erosion model. Lighter colourations of the soil on aerial photographs correspond very well with the tillage erosion model, which shows for example the extent and large impact of tillage erosion on the crest of the aqueduct. Finally, it was possible to relate the preservation of the monument with the models described above.

The study shows that one of the largest earthwork archaeological monuments in Flanders, and a site that is of international importance, is under enormous threat, primarily from tillage erosion. A proper management of the site would therefore need to include a change in land use on the site to, for example, pasture.

## Bibliografie

- BERTEN R., BUYVOETS J., GABRIELS J., MEYNEN R. & VAN DONINCK L. s.d: *Ruilverkaveling Widooie. Landschapsinventarisatie en evaluatie*, Genk.
- BURGERS A. 2001: *The Water Supplies and Related Structures of Roman Britain*, British Archaeological Reports British Series 324, Oxford.
- DE MAN J. & BRONDEEL M. 2004: Het digitaal hoogtemodel Vlaanderen, *Geo-info* 2004.2, 47-56.
- HUYBRIGTS F. 1896: *Antiquités Romaines à Tongres*, Annales de la Fédération Archéologique et Historique de Belgique 11.2, Congrès de Gand 2-5 aout 1896, Gent.
- IN 'T VEN I., WOUTERS W., VYNCKIER G. & COREMANS B. 2005: D47: Tongeren/Lauw-SP172. In: IN 'T VEN I. & DE CLERCQ W. (eds.), *Een lijn door het landschap. Archeologie en het vTn project 1997-1998 deel 1*, Archeologie in Vlaanderen. Monografieën 5, Brussel, 202-205.
- MERTENS J. 1964: *Enkele beschouwingen over Limburg in de Romeinse tijd*, Archaeologica Belgica 75, Brussel.
- MEYLEMANS E. & VAN LAECKE J. 2006: *Het Romeins aquaduct van Tongeren: erosieproblematiek en beheer*, intern rapport VIOE, Brussel.
- NOTEBAERT B., GOVERS G., VERSTRAETEN G., VAN OOST K., RUYSSCHAERT G., POESEN J. & VAN ROMPAEY A. 2006: *Verfijnde erosiekaart Vlaanderen: eindrapport*, Leuven.
- PONZETTA L., DEWINTER N. & WESEMAEL E. 2002: *Opmeting van een Romeins aquaduct*, ARON rapport 2, Tongeren.
- PONZETTA L., DEWINTER N. & WESEMAEL E. 2003: *Het Romeinse aquaduct van Tongeren*, Romeinendag 8.2, Leuven, 61-64.
- PUTNAM B. 1997: Dorchester Roman Aqueduct, *Current Archaeology* 154, 364-369.
- SCHUT P.A.C. 2005: *De aardwerken van Groesbeek: een aquaduct voor de Romeinse legioensvesting van Nijmegen?*, Rapportage Archeologische Monumentenzorg 119, Amersfoort.
- SENGERS G. 1935a: In de nabijheid van den Beukenberg te Tongeren, *De Postrijder* 16 februari 1935, 1-2.
- SENGERS G. 1935b: Oudheidkunde: Romeinse watervoorziening te Tongeren, *De Postrijder* 23 februari 1935, 1.
- SENGERS G. 1935c: Oudheidkunde: Weer een week ondergrondse opzoekingen naar de overblijfselen van Romeinsch Tongeren, *De Postrijder* 30 maart 1935, 1.
- S.n. 2003: Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen, *Nieuwsbrief GIS-Vlaanderen* 16, Brussel.
- VAN OOST K., VAN MUYSEN W., GOVERS G., DECKERS, J. & QUINE T.A. 2005: From water to tillage erosion dominated landform evolution, *Geomorphology* 72, 193-203.
- VANVINCKENROYE W. 1971: Tongeren: waterleiding en Romeinse weg, *Archeologie* 1971.1, 13-14.
- VANVINCKENROYE W. 1985: *Tongeren Romeinse stad*, Tielt.
- VANMONTFORT B., DE MAN J., VAN ROMPAEY A., LANGOHR R. & CLARYS B. 2006: De evaluatie van bodemerisatie op de neolithische site van Ottenburg/Grez-Doiceau. In: *Centrale Archeologische Inventaris (CAI) II: Thematisch inventarisatie- en evaluatieonderzoek*, VIOE-rapporten 02, Brussel, 17-28.
- VERSTRAETEN G., POESEN J., GOOSSENS D., GILIJNS K., BIELDERS CH., GABRIELS D., RUYSSCHAERT G., VAN DEN EECKHAUT M., VANWALLEGHEM T. & GOVERS G. 2006: Belgium. In: BOARDMAN J. & POESEN J. (eds.), *Soil Erosion in Europe*, Chichester, 385-411.