

Rioleringswetenschap en -techniek

jaargang 4, nr 15, 2004

pag. 10-44

Moderne persleidingen en
Romeinse hydraulische technieken

H.Paul M. Kessener



Onder redactie van:

prof. dr. ir. Jean Berlamont

prof. dr. ir. François Clemens

ir. Hans Geerse

ing. Michiel Geise

ir. Karel Michielsen

ir. Michel Moens

ir. Wicher Worst (voorzitter)

Roman hydraulic technology and modern pressurized pipeline systems

Keywords: aqueduct, Roman, pressurized conduit, static pressure, waste water, inverted siphon, lead, stone conduit, Vitruvius, air entrapment, water hammer

Efficient transportation of water has always played a key role in the exploitation of water resources, whether for domestic use or for industrial and agricultural purposes, as well as for the conveyance of waste waters. In August 2002 a colloquium was held at Delft the Netherlands, initiated by Delft Hydraulics and the Technical University Delft, together with major Dutch organizations responsible for state waste water handling, to discuss the problem of pressure losses in national sewer pipeline systems.

Investigations over a period of ten years (1990-2000) had shown that air entrapped at local high points accounted for major losses in the discharge capacity. It was calculated that the prevention of air-entrapment could reduce the operational energy costs up to thirty procent, apart from costs from redesigning because of insufficient capacity.

Ancient pipeline systems were usually applied for transport of fresh water. These gravity driven conveyance systems operated at times under conditions of fully filled conduit flow at considerable pressures up to 19 Bar. Entrainment of air at the intake of these conduits occurred in the old days just as well as it does today. Problems arising from air entrapment are discussed for ancient pressurized conduit systems, as well as the solutions the Roman engineers applied to cope with these problems. Ancient literature on the subject, of Vitruvius, with mention of proposals to handle related problems is referred to.

Moderne persleidingen en Romeinse hydraulische technieken

Trefwoorden: aquaduct, Romeins, drukleiding, afvalwaterleiding, statische druk, sifon, lood, stenen leiding, Vitruvius, luchtinsluiting, waterslag.

Efficiënt transport van water heeft altijd een essentiële rol gespeeld in de exploitatie van waterbronnen en waterreserves, zowel voor gebruik rond huis en haard en voor industrie en landbouw, als voor de afvoer van afval water. In augustus 2000 werd er in Delft een colloquium gehouden door Delft Hydraulics en de TU Delft, waaraan Nederlandse waterschappen – verantwoordelijk voor het transport van afvalwater – deelnamen, met als onderwerp: drukverliezen in afvalwaterpersleidingen.

Uit onderzoek over een periode van meer dan tien jaar (1990-2000 door het Hoogheemraadschap West Brabant (HWB)) was gebleken dat luchtinsluiting ter plekke van locale hoge punten in een afvalwaterpersleiding aanleiding had gegeven tot aanzienlijke drukverliezen en daardoor tot grote afname in de transportcapaciteit. Er kon worden berekend dat het voorkomen van luchtinsluiting de operationele kosten met dertig procent konden worden gereduceerd, dit afgezien van eventuele kosten van herontwerpen van het leidingsysteem, vanwege onvoldoende capaciteit.

In de Romeinse tijd geschiedde watertransport door middel van aquaducten. Minder bekend is dat in de oudheid ook drukleidingen werden toegepast. In deze door de zwaartekracht gedreven systemen konden soms aanzienlijke drukken, tot 19 Bar, voorkomen. Problemen door luchtinsluiting waren destijds evenzeer aan de orde als tegenwoordig. In dit artikel worden antieke drukleiding systemen besproken, met de daarbij voorkomende problemen, alsook de oplossingen die de Romeinse ingenieurs daarvoor toepasten. Romeinse literatuur hierover, van Vitruvius, komt daarbij kort aan de orde.

Moderne persleidingen en Romeinse hydraulische technieken

H. Paul M. Kessener ¹⁾

E-mail: lenl@euronet.nl.

In augustus 2000 werd er in Delft een colloquium georganiseerd door Delft Hydraulics en de TU Delft, waaraan Nederlandse waterschappen – verantwoordelijk voor het transport van afvalwater – deelnamen. Onderwerp: drukverliezen in afvalwaterpersleidingen. Uit onderzoek door het Hoogheemraadschap West Brabant (HWB) over een periode van meer dan tien jaar (1990-2000) was gebleken dat luchtinsluiting ter plekke van locale hoge punten in een afvalwaterpersleiding aanleiding had gegeven tot aanzienlijke drukverliezen en daardoor tot grote afname in de transportcapaciteit.

In de Romeinse tijd geschiedde watertransport door middel van aquaducten. Minder bekend is dat in de oudheid ook drukleidingen werden toegepast. Problemen door luchtinsluiting waren destijds evenzeer aan de orde als tegenwoordig. In dit artikel worden antieke drukleiding systemen besproken, met de daarbij voorkomende problemen, alsook de oplossingen die de antieke ingenieurs daarvoor toepasten. Vooraf enige gegevens over de problematiek in moderne persleidingen.

Drukverliezen in moderne afvalwaterpersleidingen. ²⁾

In het algemeen wordt ervan uitgegaan dat de transportcapaciteit van (afvalwater)persleidingen niet verandert bij constante prestatie van de pompen. In werkelijkheid zakt de capaciteit veelal beneden de ontwerpwaarde, hetgeen echter onopgemerkt kan blijven omdat de pompcapaciteit met overwaarde werd ontworpen of omdat er geen adequate mogelijkheden zijn om de werkelijke omstandigheden in de leiding te meten. Leveranciers van pijpleidingen refereren meestal aan de wandruwheid als belangrijkste factor voor

drukverliezen, terwijl de effecten van bio-films, corrosie, afzettingen, incrustaties en 'scaling' vaak onderbelicht blijven.

Voor de zestig kilometer lange afvalwaterpersleiding (AWP) van de Moerdijk naar Bath bij het Schelde-Rijn kanaal, die 15.000 kubieke meter afvalwater per uur door 800-1800 mm betonnen buizen transporteert, bleken de drukverliezen veel groter dan te voren ingeschat, met daarbij aanzienlijke wisselingen door de tijd heen. Dit hield in dat de leidingcapaciteit sterk was verminderd, hetgeen gecompenseerd moest worden door hogere pomp prestaties. Tenslotte zou in de toekomst zelfs een extra leidingsysteem moeten worden aangelegd.

Uit het onderzoek bleek dat incrustaties en 'scaling' slechts een klein effect hadden op de pijpweerstand en dat het ontstaan van bio-films juist aanleiding vormde tot afname van de weerstand als gevolg van vermindering van de wandruwheid.

³⁾ Afzetting van materiaal op de pijpbodem kunnen bij lage stroomsnelheden een probleem vormen, maar dit werd in het onderzochte systeem niet waargenomen. Tot ieders verrassing werden grote hoeveelheden gas aangetroffen bij een aantal hoge punten in de AWP. Dit gas bestond voornamelijk uit stikstof, in tegenstelling tot biogassen, zoals methaan en kooldioxide, die men eigenlijk verwacht had. Het bleek dus te gaan om luchtinsluiting.

Men moest concluderen dat er lucht in de leidingen werd meegenomen bij de inname punten en dat de vorming van luchtzakken bij de hoge punten bepalend was voor de drukverliezen en de afname in capaciteit, met name onder discontinue operationele omstandigheden. Door deze onverwachte bevinding kon men berekenen dat met

het verhinderen van luchtinsluiting de operationele kosten met dertig procent konden worden teruggebracht, dit nog afgezien van de eventuele kosten van herontwerpen en vernieuwen van het leidingsysteem. Insluiting van lucht in drukleidingen is echter een aloud probleem dat teruggaat tot in de oudheid.

Romeinse waterleidingen

In de Romeinse tijd werd water over soms zeer grote afstanden werd aangevoerd door middel van aquaducten: gemetselde open kanalen met een geleidelijk afdalende gradiënt vanaf bron tot bestemming, meestal een stad (tabel 1). Het oudste aquaduct van Rome, de *Aqua Appia*, werd aangelegd in de derde eeuw v.Chr. Tijdens de *Pax Romana*, een periode in het Romeinse keizerrijk zonder grote politieke conflicten (tweede eeuw n.Chr.), was sprake van een enorme toename in welvaart. Vrijwel iedere stad, groot of klein, kreeg

een aquaduct of breidde het aantal aquaducten uit om aan de exponentieel stijgende vraag naar water te voldoen. Dit in verband met de groeiende bevolking, de in aantal toenemende publieke badgebouwen en privé baden en de luxe in het algemeen. 4)

Alleen al in *Gallia* (Frankrijk), waren er meer dan driehonderd aquaducten. 5) Stromend water werd een standaard voorziening, gefinancierd door de keizer of door weldoeners die dan in een inscriptie werden vermeld. Het aquaduct eindigde vaak in een *nymphaeum*, een geornamenteerde openbare fontein, of in een *castellum divisorium* 6), een met versieringen uitgerust verdeelstation (figuur1,2). Vaak verliep het tracé van een aquaduct voor een gedeelte door bergachtige gebieden of geaccidenteerd terrein. Om de waterloop te garanderen, werden tunnels en bruggen geconstrueerd en werd het kanaal soms in steile rotswanden uitgehakt (figuur 3).



**Figuur 1: (links)
Het nymphaeum van Aspendos.**



**Figuur 2: (onder)
Castellum divisorium van Nîmes, 5_m diameter, met 10 uitgaande leidingen in de wand. De 3 openingen in de bodem kwamen uit op een afvalwater kanaal.**

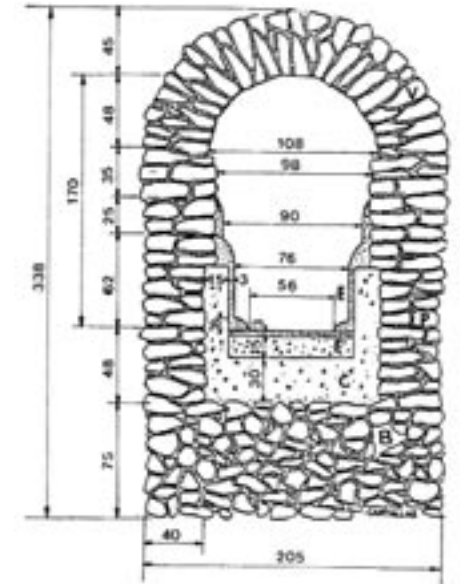


**Figuur 3:
Kanaal van het aquaduct van Side (zuidkust van Turkije), uitgehakt in loodrechte rotswand bovenlangs de Manavgat rivier.**

		Km
Constantinople	(Turkije)	250
Carthago	(Tunesië)	132
Keulen	(Duitsland)	95
Rome (Aqua Marcia)	(Italië)	91
Rome (Anio Novus)	(Italië)	87
Lyon (Gier)	(Frankrijk)	75
Rome (Aqua Claudia)	(Italië)	69
Lyon (Brévenne)	(Frankrijk)	66
Rome (Anio Vetus)	(Italië)	64
Rome (Aqua Traiana)	(Italië)	58
Pergamon (Kaikos)	(Turkije)	50
Nîmes	(Frankrijk)	50
Arles	(Frankrijk)	48
Cherchel	(Algerije)	45

Tabel 1: Lengten van grotere aquaducten. 9)

Men zou kunnen zeggen dat het aquaductkanaal zodanig geleidelijk moest aflopen dat een kegelbal die een zetje krijgt bij het begin van het aquaduct vanzelf naar de eindbestemming rolt. Voor het Keulse aquaduct was dat een afstand van 95 kilometer. Het aquaduct van Constantinopel, dat meer dan vijftig grote bruggen telde, was zelfs 250 kilometer lang. Enorme prestaties wat landmeting, ontwerp en planning betreft. 7) De meestal anonieme Romeinse ingenieur, die de taak had gekregen om water van goede kwaliteit naar de stad te voeren en de problemen waarmee men gecon-



Figuur 4: Doorsnede van het kanaal van het Brevenne aquaduct bij Lyon (Burdy 1993).

Figuur 5: Binnenaanzicht van het Brevenne aquaduct (foto: J. Burdy).



Figuur 6:
Kanaal van het aquaduct van Carthago.



Figuur 7:
Opgegraven kanaal van het 95 km lange aquaduct van Keulen, met 'Einstiegschacht' (foto: K. Grewe).

fronteerd werd op te lossen, bleef daarbij op de achtergrond.⁸⁾

De kanalen waren in het algemeen gemetseld met ruim bemeten fundering en wanden en veelal

Figuur 8:
Aquaduct van Carthago, kanaal op bogen in de Miliane vlakte.



overdekt door een tongewelf (figuur 4-6). De afmetingen konden nogal verschillen. De grote aquaducten konden van binnen geïnspecteerd worden.¹⁰⁾ Op regelmatige afstanden bevonden zich openingen in de bovenzijde van het kanaal waardoor, bij ondergrondse aanleg door middel van een schacht (inspection shaft, regard, Einstiegschacht), toegang tot het aquaductkanaal kon worden verkregen (figuur 7).

Ter overbrugging van lager gelegen delen van het traject werd het aquaductkanaal over soms lange afstanden op bogen geïmplementeerd om het verval te minimaliseren en te garanderen dat het water op zijn bestemming aankwam. Het aquaduct van Carthago liep over een afstand van zeventien kilometer op tot meer dan dertig meter hoge pijlers om de Miliane vlakte over te steken (figuur 8).¹¹⁾ De aquaducten van Rome zijn beroemd vanwege de eindeloze rijen bogen die door de Romeinse Campagna lopen waarvan gedeelten nog overeind staan.

Sommige van de latere kanalen voor Rome werden uit kostenbesparing bovenop een ouder kanaal aangelegd, zodat van de constructie van nog weer een lange rij bogen kon worden afgezien. De binnenzijde van de aquaductkanalen werd afgesmeerd met een speciaal soort specie, opus signinum, dat waterdicht was en relatief ongevoelig voor rek en krimp.¹²⁾ Omdat de Romeinen van-



Figuur 9:
Aquaduct van Keulen, tot 30 cm dikke kalkafzetting op de wanden en bodem van het kanaal.



Figuur 10:
Kreuzweingarten. Pastoor toont altaarplaat van aquaduct-marmer.



Figuur 11:
Aquaduct van Nîmes, Pont du Gard (foto: E. van Leeuwen)

wege de smaak de voorkeur gaven aan kalkhoudend water, ontstond vaak kalkafzetting (sinter) op

de wanden waardoor de kanaalafmetingen in de loop der tijd aanzienlijk konden afnemen (figuur 9).¹³⁾



Figuur 12:
Pont du Gard, detail (foto: E. van Leeuwen).

De gradiënt of hellinghoek van het kanaal varieerde per aquaduct en per gedeelte van het aquaduct. Het vijftig kilometer lange aquaduct van Nîmes, waarvan de Pont du Gard een onderdeel is, heeft een gemiddelde gradiënt van 35 centimeter per kilometer (figuur 11,12). 14) Stroomafwaarts van de Pont du Gard is de gradiënt over tien kilometer zeer geaccidenteerd en bergachtig terrein nog maar zeven centimeter per kilometer, een nauwkeurigheid die ook tegenwoordig als aanzienlijk mag worden beschouwd. Het aquaduct van Carthago heeft daarentegen een gradiënt van 95 meter per kilometer voor de eerste zes kilometer

vanaf de bron bij Zaghouan en nog steilere gradiënten zijn bekend (figuur 13).¹⁵⁾

De hoeveelheid water die getransporteerd werd, kon zeer groot zijn. De elf aquaducten van Rome hadden een totaal debiet van meer dan één miljoen kubieke meter per 24 uur, vergelijkbaar met de waterbehoefte van Parijs in de 70-er jaren. Het aquaduct van Keulen, 95 kilometer lang, transporteerde vanuit de Eifel ruim 21.000 kubieke meter per 24 uur naar Colonia Agrippinensis. Ook Nijmegen, Noviomagus, zou een bescheiden aquaduct hebben gehad, zeven kilometer lang, dat liep

Figuur 13:
Aquaduct van Carthago, kanaal kort na beginpunt bij Zaghouan, met sterk dalende gradiënt.



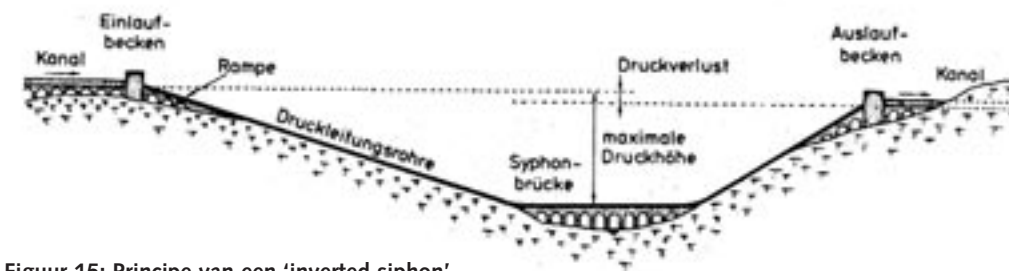
Figuur 14:
Aquaduct van Carthago, afname punt voor lokale bevolking.

van Berg en Dal naar het legerkamp op het Kops Plateau. 16) Dat de Romeinen trots waren op hun aquaducten blijkt uit hun geschriften. De Romeinse schrijver Plinius meende dat de Egyptische piramiden in vergelijking eigenlijk niets voorstelden.

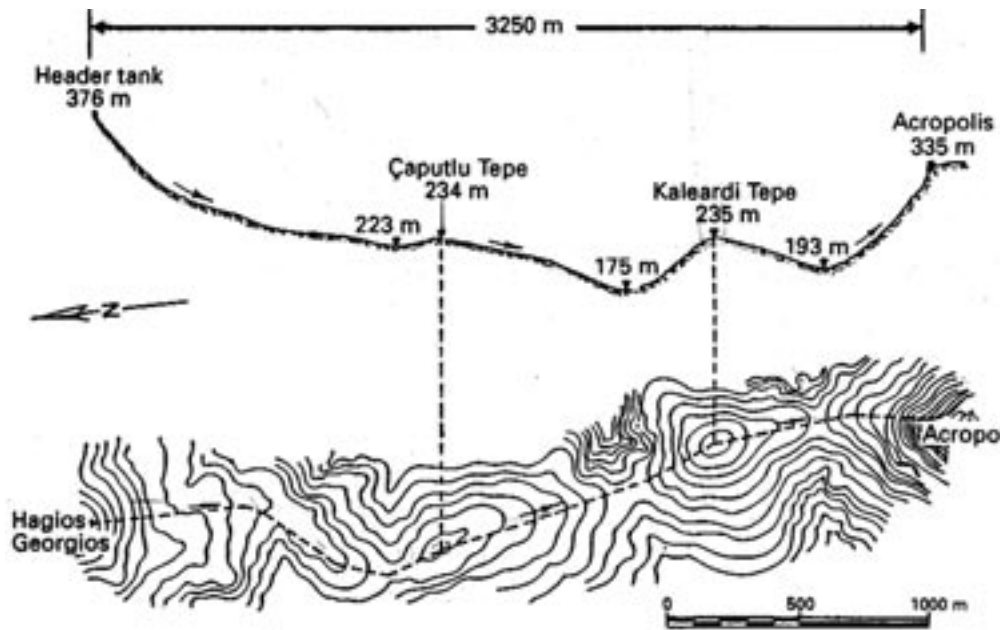
Drukleidingen

De Romeinse ingenieur had slechts één middel ter beschikking om water over grote afstanden te transporteren: de zwaartekracht. Hij hoefde er alleen maar voor te zorgen dat het water van begin tot eind naar beneden kon stromen. Het probleem hierbij was om een kanaal te ontwerpen dat aan deze voorwaarde voldeed, hetgeen zoals gezegd nauwkeurige surveys over grote afstanden inhield en de constructie van soms zeer lange tunnels en bruggen.

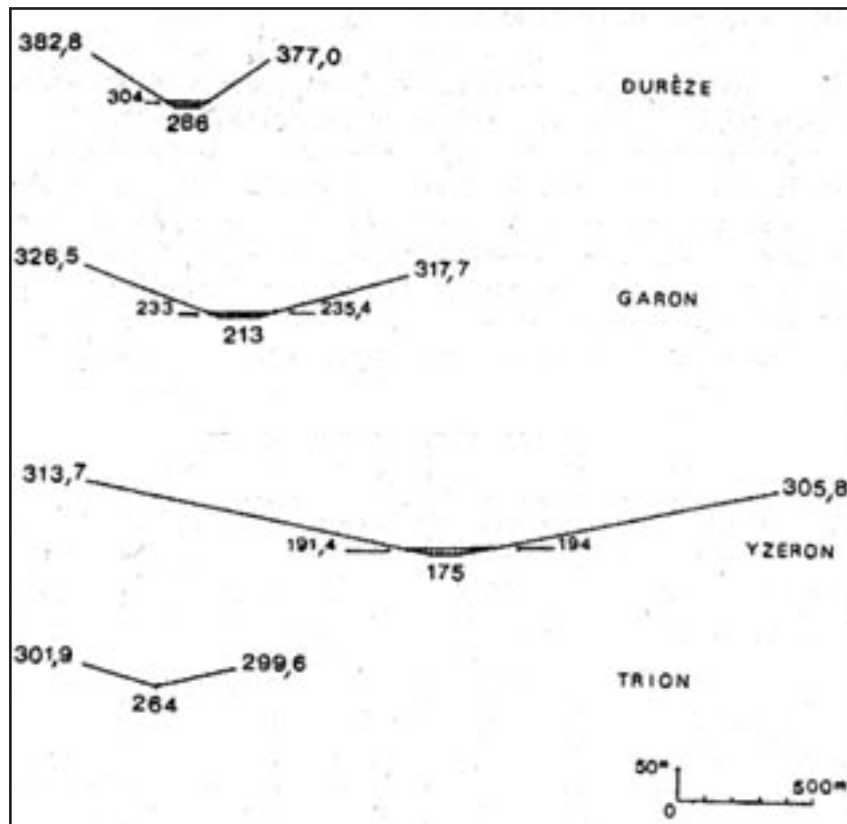
Wanneer een vallei te diep of te wijd was om per brug over te steken of erom heen te gaan, werd gebruik gemaakt van een zogeheten 'inverted siphon', duiker of zinker op zijn Nederlands, in het volgende gemakshalve sifon genoemd. Het water werd hiermee naar de overzijde van de vallei gevoerd door middel van een gesloten leiding volgens het principe van communicerende vaten. Het water stroomde vanuit het aanvoerende kanaal via een instroomtank (header tank, reservoir de fuite, Einlaufbecken) een pijpleiding in. Deze leiding liep dan over een afdalende hellingbaan naar beneden, om aan de andere zijde van de vallei weer op te stijgen naar een wat lager gelegen uitstroomtank (receiving tank, reservoir de chasse, Auslaufbecken). Vaak voerde men de leiding in het laagste deel van de vallei over een



Figuur 15: Principe van een 'inverted siphon'.



Figuur 16: Profiel en traject van de Madradag sifon bij Pergamon, 2e eeuw v.Chr. (naar Fahlbusch 1982).



Figuur 17: Schematische weergave van de 4 sifons van het Gier aquaduct van Lyon (Burdy 2002).

Stad	Aquaduct	Sifon	Leiding materiaal	Length depth (m)	Max. gradient (m)	Hydraulic (m/km)
Smyrna (Turkije)	Kara-Bunar	Kara-Bunar	Keramiëk/steen	4400	158	1.1 (?)
Lyon (Frankrijk)	Yzeron	Craponne-Lyon	lood	3600	91	9.2
Lyon (Frankrijk)	Mont d'Or	d'Ecully	lood	3500	70	3.1
Lyon (Frankrijk)	Brévenne	Grange-Blanche (Ecully)	lood	3500	90	4 - 5.6 (?)
Pergamon (Turkije)	Madradag	Pergamon	lood	3250	190	12.6
Alatri (Italië)	Alatri	Alatri	lood	3000	100	9 (?)
Lyon (Frankrijk)	Gier	Beaunant (l'Yzeron)	lood	2660	122	3.0
Lyon (Frankrijk)	Yzeron	Grezieux-Craponne	lood	2200	33	3.2
Aspendos (Turkije)	Aspendos	Aspendos	steen	1670	45	8.3
Termini Im. (Sicilië)	Cornelio	Barratina	lood	1300	40	3,8
Lyon (Frankrijk)	Gier	Soucieu (le Garon)	lood	1210	93.5	
Laodikeia a/L (Turkije)	Laodikeia	Laodikeia	steen	800	50	26
Lyon (Frankrijk)	Gier	St. Genis (la Durèze)	lood	700	79	8.3
Lyon (Frankrijk)	Gier	St. Irénée (Trion)	lood	575	38	4
Oinoanda (Turkije)	Oinoanda	Oinoanda	steen	500-700	22	6 - 16 (?)
Lyon (Frankrijk)	Mont d'Or	Cotte-Chally(R.Limonest)	lood	420	30	19
Patara (Turkije)	Patara	Delik Kemer	steen	260	20	18.5

Tabel 2: Lengte, maximale diepte, en hydraulische gradiënt van enige klassieke sifons. Voor gradiënten met (?) bestaat onzekerheid over de exacte locatie van in- en/of uitstroomtank.

'sifonbrug', zodat de rivier in het dal de sifon ongehinderd kon passeren (figuur 15). Deze techniek met drukleidingen stamt uit de Hellenistische tijd. Afhankelijk van de diepte van de vallei kon de druk in de antieke sifons aanzienlijk zijn (tabel 2). 17) De langste sifon, met 4.400 meter, is die van Smyrna, aan de westkust van Turkije, het huidige Izmir. De hoogste statische druk werd bereikt in de Madradag-sifon van Pergamon, 19 bar (figuur 16). 18)

De vier aquaducten van Lyon waren uitgerust met in totaal negen grote sifons. Het Gier aquaduct, met 75 kilometer het langste van de Lyon-aquaducten, had er vier. De sifons waren tot 120 meter diep en tot ruim 3,5 kilometer lang (figuur 17,18). Ze bestonden in verband met de vereiste capaciteit telkens uit negen tot elf parallel naast elkaar gelegen twintig centimeter diameter loden leidingen. De hoeveelheid lood die gebruikt werd voor deze sifons, samen met een totale lengte van 16,6 kilometer, was enorm: ze wordt geschat op 10.000-15.000 ton. 19) Het lood is natuurlijk verdwenen en hergebruikt voor bijvoorbeeld daken van ker-

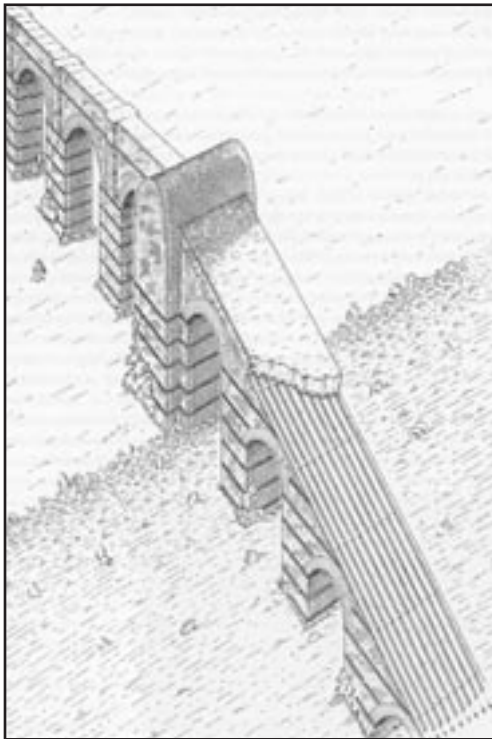
ken, maar er is nog een aantal, deels gerestaureerde, instroom- en uitstroomtanks bewaard gebleven, soms met de aansluitende hellingbaan, alsook delen van sifonbruggen (figuur 19,20).



Figuur 18: Sifonbrug van de Yzeron sifon van het Gier aquaduct (opname 1950), genoemd 'Pont de Beaunant' (Burdy 1996).



Figuur 19:
Header tank van de Yzeron sifon van het Gier aquaduct, met afdalende hellingbaan (bij Chaponost).



Figuur 20:
Reconstructie van begin van de Yzeron sifon met 9 parallelle loden leidingen (naar Haberey 1972).

De leidingen voor de sifons werden gemaakt uit diverse materialen: lood, steen, terracotta, of combinaties hiervan. Ze werden samengesteld uit geprefabriceerde pijpstukken. De lengte hiervan varieerde, 40-70 centimeter voor terracotta pijpen,



Figuur 21:
Pijpelement van de Aspendos sifon (kalksteen).



Figuur 22:
Delik Kemer sifon van het Patara aquaduct, kalkstenen leidingelementen 90x90x50 cm.



Figuur 23:
De dubbele stenen sifon van Laodikeia a/L., bij Pamukkale (Turkije), afdalende been. De headertank bevond zich bij de elektriciteitspaal boven op de helling.



Figuur 24:
Stenen sifonleiding in situ bij de stadsmuur van Oinoanda.

50-100 centimeter voor geperforeerde stenen blokken, tot drie meter voor loden leidingen. De loden pijpen werden gegoten of gemaakt uit loden platen, die rond een mandril in pijpvorm werden gevouwen en overlans dicht werden gesoldeerd. 20)

De pijpelementen werden verbonden door het uiteinde van het ene pijpstuk in het wat grotere uiteinde van het volgende pijpstuk te schuiven (terracotta pijpen), of door middel van een 'socket and flange' verbinding, gebruikelijk bij stenen en terracotta leidingen. De grote tot één meter vierkant kalkstenen pijpelementen van Aspendos, Patara en Laodikeia ad Lykum zijn van dit laatste type, alsook de kleinere vijftig centimeter kubusvormige leidingstenen van Oinoanda (figuur 21-24). 21)

De sifon van Smyrna zou hebben bestaan uit stenen leidingelementen, afgewisseld met terracotta pijpstukken. De verbindingen werden afgedicht met een mengsel van ongebluste kalk, olie en plantaardige bestanddelen. Dit materiaal zet uit wanneer het in contact komt met water. 22) Loden leidingstukken werden soms verbonden door middel van 'socket and flange', eventueel via een



Figuur 25:
Kalkafzettingen in de leiding van de Laodikeia sifon.

stenen tussenstuk of door middel van een loden mof, die over beide einden werd geschoven en afgedicht met het expanderende mengsel. Maar in het merendeel van de gevallen werden ze aan elkaar gesoldeerd.

Er zijn gedeelten van loden drukleidingen bewaard gebleven. In 1992 onderzocht de Deen Hansen 33 loden pijpstukken die over een periode van vele jaren (1570-1825) uit de Rhône waren opgevestigd en nu in het museum van Arles bewaard worden (figuur 26).²³⁾ De pijpstukken, met een diameter van 10-12 centimeter, zijn drie meter lang en vertonen een soldeernaad overlans. Het betreft delen van een sifon die dwars over de bodem van de Rhône liep en Arles met Trinquetaille verbond. De pijpstukken waren eerst met het ene eind in het andere geschoven en met een flinke spijker die dwars door beide einden was geslagen verbonden. Een dikke laag lood werd vervolgens om beide einden gesoldeerd inclusief de spijker die in sommige pijpstukken nog te zien is en ongetwijfeld de doorstroming van het water moet hebben beïnvloed. Hansen merkte op dat deze verbindingen geen zwakke punten in de leiding vormden ('waren

nicht das schwache Glied der Kette'), een indicatie voor de goede soldeertechniek van de Romeinen. Dit soort loden leidingen kunnen in principe beschouwd worden als samengesteld uit homogeen materiaal. Dit ligt anders voor leidingen die zijn samengesteld uit pijpstukken afgedicht met het expanderende mengsel. De treksterkte van dit afdichtingsmateriaal is veel geringer dan van het pijpmateriaal zelf, zoals steen of terracotta. Dit soort leidingen kon gemakkelijk bij de verbindingen worden losgetrokken of uit elkaar worden gedrukt.

De antieke drukleidingen kunnen derhalve in twee categorieën onderverdeeld worden. Cat. I-leidingen zijn van lood en hebben gesoldeerde verbindingen. Deze leidingen zijn als 'homogeen' te beschouwen. Cat. II-leidingen hebben verbindingen die zijn afgedicht met het relatief zwakke expanderende mengsel. Ze dienen als 'niet-homogeen' te worden beschouwd. Hoe reageren deze twee soorten leidingen op interne druk? De interne druk, nodig om een pijp van homogeen materiaal te doen barsten dwars op zijn lengte, is min-

stens twee maal zo groot als de druk die nodig is om de pijp overlans te doen barsten.²⁴⁾

Pijpen van homogeen materiaal barsten daarom altijd overlans, als een knakworstje in de pan. De cat. II-leidingen hebben echter de neiging om te barsten ter plekke van de verbindingen. De keuze van het materiaal voor de leiding van de sifon bepaalde zo de voorzieningen die getroffen moesten worden om het functioneren van de sifon te garanderen en schade te voorkomen. Om dit te kunnen inschatten, moeten de effecten van stroming van water in drukleidingen worden geëvalueerd. Bepalende factoren zijn statische druk, krachten door de stroming van water, effecten door de aanwezigheid van lucht, en drukveranderingen/waterslag.

Statische druk

Voor een met water gevulde sifon zonder stroming hoeft alleen rekening gehouden te worden met de statische druk. De statische druk in enig punt van de leiding wordt bepaald door de verticale afstand tussen dat punt en het vrije water oppervlak. Voor een recht leidingstuk oefent de waterdruk krachten uit loodrecht op de pijpwand langs de omtrek van de pijp, welke krachten elkaar opheffen zolang de treksterkte van het materiaal van de wand voldoende groot is. Dit geldt in principe voor beide categorieën leidingen aangenomen dat voor de cat. II leidingen verschuiving van een pipelement langs de leidings-as afdoende wordt verhinderd door het volgende pipelement enz. De situatie verandert echter bij een bocht in de leiding. Daar kunnen problemen ontstaan. Het pipelement in de bocht ondervindt immers ten gevolge van de statische druk een netto kracht naar buiten gericht langs de bissectrice van de pijphoek:

$$F = 2pA \sin\left[\frac{\alpha}{2}\right] \quad (1)$$

met:

p = statische druk in N/m^2

A = doorsnede van de pijp in m^2

α = bochthoek

Voor een bocht van 180 graden, een 'U-turn', is deze kracht maximaal, terwijl voor een recht lei-

dingstuk, met $\alpha = 0$ graden, deze kracht natuurlijk nul is. De statische druk p op h meter onder het vrije wateroppervlak is gelijk aan

$$p = \rho gh \quad (2)$$

met:

ρ = specifieke massa van water $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$

g = versnelling van de zwaartekracht = 9.81 m/sec^2

Voor een bocht met een hoek van 30 graden in een 28 cm diameter leiding bij een druk van 40 m waterkolom, zoals voor de Aspendos sifon van toepassing is bij de overgang van het afdalende deel naar het horizontale deel, geldt dan

$$F = 2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 40\text{m} * \frac{\pi}{4} * (0,28\text{m})^2 * \sin(15^\circ) = 12.507 \text{ N}$$

of ongeveer 1275 kgf.

Deze kracht kon bij dit soort verticale bochten worden opgevangen door adequate fundering van de leiding. Voor de grote Madradag-sifon van Pergamon moeten deze krachten vanwege de hoge statische druk aanzienlijk zijn geweest. Deze drukleiding was samengesteld uit drie meter lange gegoten loden pijpstukken, verbonden door loden moffen die over de verbindingsnaden waren geschoven. De 17,5 centimeter diameter leiding werd intact gehouden door ieder afzonderlijk pijpstuk in een geperforeerde plaatvormige steen te fixeren en het geheel onder de grond aan te leggen. Bij de verticale bochten van ongeveer 20 graden ter plekke van de richtingverandering op de toppen van de twee tussenliggende heuvels (de Caputlu tepe en de Kaleardi tepe, 136 en 146 meter onder de instroomtank), waren deze stenen extra groot uitgevoerd (1,5 kubieke meter respectievelijk 2,3 kubieke meter), om de verticaal naar boven gerichte kracht vanwege de statische druk (zo'n 11.000 N en 12.000 N) te compenseren (figuur 27).²⁵⁾

Voor drukleidingen van de tweede categorie zal de kracht op een hoekstuk, als gevolg van de statische druk, worden afgeleid naar de aangrenzende pijpstukken, slechts voorzover het afdichtingsmateriaal ze bij elkaar kan houden. Extra maatregelen



Figuur 27:
Madradag sifon bij Pergamon, top Kaleardi Tepe, geperforeerde stenen ter fixatie van de loden leiding. Op de achtergrond de acropolis van Pergamon.



Figuur 28:
Delik Kemer siphon van het Patara aquaduct, duvelgaten voor metalen klampen ter fixatie van de leidingstenen.

moesten dus verhinderen dat het bochtelement uit positie werd geduwd. Dit kon worden gedaan door de leiding op vaste fundering te leggen (bij verticale bochten) of door massa toe te voegen om gewicht te vergroten, zoals bij Pergamon, of om de wrijvingskrachten met de ondergrond te verhogen,

in de vorm van zand of steunberen (horizontale bochten).

Soms werden pipelementen onderling verbonden door middel van metalen klampen (toegepast in de Delik Kemer sifon van Patara, figuur 28). Voor pijpleidingen van de eerste categorie, de loden aan elkaar gesoldeerde leidingen, was dit niet van toepassing, aangezien deze leidingen als homogeen kunnen worden beschouwd en de krachten op de bochten werden weggeleid via de pijpwand. De leiding als geheel zou eventueel gefixeerd moeten worden om verschuiving te voorkomen, maar zou slechts daar barsten waar de druk het hoogst was: in het diepste gedeelte van de sifon.

Effecten van stroming van water

De krachten die door de waterstroom op de leiding worden uitgeoefend betreffen wrijvingskrachten tussen het water en de wand van de leiding ('drag') en, bij bochten, de kracht die moet worden uitgeoefend op de waterstroom om deze van richting te doen veranderen ('inertial thrust'). Aangezien de snelheid van het water direct aan de leidingwand gelijk nul is, wordt de drag voornamelijk bepaald door de viscositeit en de turbulentie

van het water. Aangenomen dat wandruwheid en leidingdiameter constant zijn, komt het erop neer dat ieder pijpstuk wordt onderworpen aan een kracht in de richting van de waterstroom. En die kracht heeft een zekere waarde per eenheid van leidinglengte.

Het hierdoor veroorzaakte energie verlies correspondeert voor de gehele sifon met het hoogtevries tussen in- en uitstroomtank. Voor de stenen drukleiding van Aspendos, met een hoogtevries van 14,5 meter over een lengte van 1.670 meter (hydraulische gradiënt = $14,5/1670 = 8,3$ m/km, zie tabel 2), betekent dit ongeveer 0,008 N/cm² per meter leiding (diameter van de leiding 28 centimeter). Voor een gemiddelde lengte van vijftig centimeter per leidingsteen is dit een kracht van 2,62 N ofwel het equivalent van een gewicht van 270 gram, een grootte die verwaarloosd kan worden in vergelijking met de wrijvingskrachten tussen de leidingstenen en de ondergrond.

Bij de bochten in de leiding, waar de stromingsrichting wijzigt, wordt een kracht uitgeoefend op het bochtelement (de 'inertial thrust'), die in relatie staat met de verandering van richting van de impuls en die de neiging heeft het bochtelement uit zijn positie te drukken. Deze kracht, die, om het juist te zeggen, door het bochtelement 'op het water dient te worden uitgeoefend om de stromingsrichting te doen veranderen', wordt gerepresenteerd door een vector langs de bissectrice van de bochthoek, aangenomen dat de stromingssnelheid constant is bij gelijkblijvende leidingdiameter. De impuls verandering dP van een watervolume $A \cdot dx$ (A is de diameter van de leiding en dx de dikte van een corresponderend 'schijfje' water) dat de bocht omgaat is gelijk aan

$$dP = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot dx \cdot v \cdot \sin \left[\frac{\beta}{2} \right] \quad (3)$$

met:

β = de bochthoek,

ρ = specifieke massa van water (kg/m³)

v = gemiddelde stromingssnelheid van het water (m/sec).

De gemiddelde stromingssnelheid kan worden geschat met behulp van de formule van Darcy-Weissbach:

$$v^2 = \frac{8g \cdot \Delta H \cdot R_h}{\lambda \cdot L} \quad (4)$$

met:

g = zwaartekracht constante (9,81 m/sec²),

R_h = hydraulische radius van de leiding

(= $D/4$ voor een volle leiding),

D = diameter van de leiding,

ΔH = hoogte verlies tussen begin en eind van de leiding,

L = totale lengte van de leiding,

λ = wrijvingsfactor afhankelijk van de ruwheid van de binnenwand van de leiding.

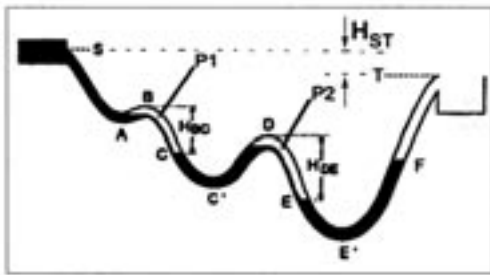
De stromingssnelheid in antieke sifons was niet bijzonder groot. Voor de 1.670 meter lange Aspendos sifon, met zijn 28 cm diameter stenen leiding, een wandruwheid van minstens enkele mm ($\lambda \sim 0,043$) en een hoogte verschil van 14,5 meter, zowel als voor de 3.250 meter lange Pergamon drukleiding, binnendiameter van de loden leiding 17,5 centimeter, wandruwheid minder dan 1 mm ($\lambda \sim 0,026$), en een hoogte verschil van 45 meter, is deze snelheid bij maximaal debiet ongeveer 1m/sec, dit wil zeggen gelijk aan de gemiddelde wandelsnelheid. ²⁶⁾

Dit betekent dat bijvoorbeeld voor een horizontale bocht van 55 graden, zoals deze voorkomt in de Aspendos leiding (daarover later meer), de op te brengen kracht gelijk is aan ongeveer 6 kgf. ²⁷⁾ Ook deze kracht is klein vergeleken met de wrijvingskrachten tussen de stenen leidingblokken en de ondergrond waarop ze liggen en kan dus gemakkelijk worden opgebracht, gezien het gewicht van de leidingblokken.

De kracht is ook klein ten opzichte van de krachten die door de statische druk worden uitgeoefend op het bochtelement. Dit betekent dat voor antieke sifons de effecten van de stroming van water verwaarloosd kunnen worden en er geen extra voorzieningen nodig waren om de leiding intact te houden. Dit ligt natuurlijk anders voor hoge stromingssnelheden, zoals die in moderne systemen aan de orde kunnen zijn.

Lucht

Er kunnen om verschillende redenen problemen ontstaan met de werking van een sifon vanwege



Figuur 29:
Luchtzakken bij hoge punten in een sifon. Indien het totaal van de verticale hoogte van de gecompriëerde luchtzakken HBC+HDE groter is dan het beschikbare verval HST kan de sifon niet opstarten.

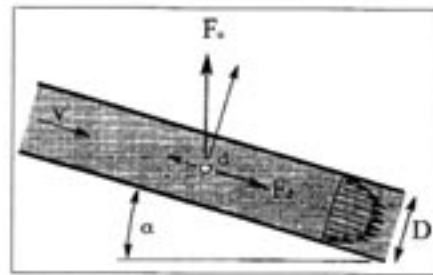
de aanwezigheid van lucht in de leiding. Bij het opstarten van een sifon kunnen aan de stroomafwaartse zijde van hoge punten luchtzakken ontstaan (figuur 29). Deze, afhankelijk van de diepte, minder of meer gecompriëerde luchtzakken reduceren het drukverschil tussen begin en eind van de sifon. Het kan zelf zo zijn dat de sifon daardoor geheel niet opgang komt. Bij diepe sifons worden luchtzakken door de hoge statische druk samengeperst en een deel van de lucht in het water opgenomen, waardoor dit effect minder groot is.

In de Madradag-sifon van Pergamon waren, zoals eerder aangegeven, twee hoge punten ter plekke van twee heuvels. In verband met de hoge statische druk werden de luchtzakken zodanig verkleind dat het debiet slechts tot negentig procent van de maximale waarde werd gereduceerd. Er was echter een bijkomend probleem. Bij de instroomtank kon lucht worden meegenomen in de leiding en meegevoerd naar de luchtzakken. Hierdoor kon het volume van de luchtzakken toenemen, waardoor het drukverschil tussen begin en eind van de sifon verder kon afnemen. Dit zou kunnen leiden tot het volledig stoppen van de waterstroom. ²⁸⁾

Aan de andere kant is er aan de lage zijde van de luchtzakken sprake van een transitie van een gedeeltelijk gevulde leiding naar een volledig



Figuur 30:
Instroomtank van de Madradag sifon, toestand in 1913 (naar Garbrecht 1978/1987).



Figuur 31:
Luchtbel in dalende leiding. De luchtbel zal in principe stationair blijven indien de meeslepende kracht ten gevolge van de waterstroom Fd gelijk is aan de opwaartse kracht Fu maal de sinus van de hellingshoek alfa.

gevulde leiding, een punt waar weer lucht met de waterstroom verder de leiding in kan worden gevoerd. Hierdoor kunnen de luchtzakken in volume weer afnemen. Het effect dat het grootste is, bepaalt wat er uiteindelijk gebeurt. En wat er gebeurt, wordt bepaald door het gedrag van luchtbelllen in leidingen. ²⁹⁾

Het gedrag van luchtbelllen in leidingen hangt samen met luchtbelgrootte, leidingdiameter, hellingshoek van de leiding, stromingsnelheid van het water, ruwheid van de binnenwand, en viscositeit van het water. Een luchtbel zal met de waterstroom naar beneden worden meegevoerd indien de stromingsnelheid een bepaalde kritische waarde Vcr overschrijdt (figuur 31). Men kan afleiden dat

$$V_{cr} = \sqrt{4 \cdot g \cdot D_b \cdot \frac{\sin \alpha}{3 \cdot C_b}} \quad (5)$$

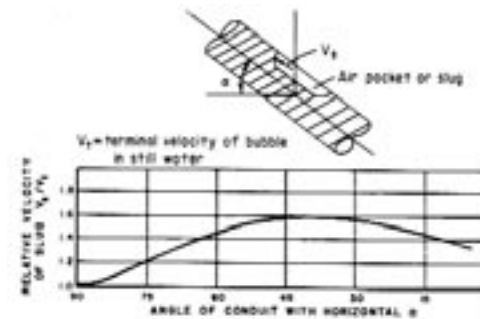
met:

g = versnelling van de zwaartekracht = 9,81 m/sec²

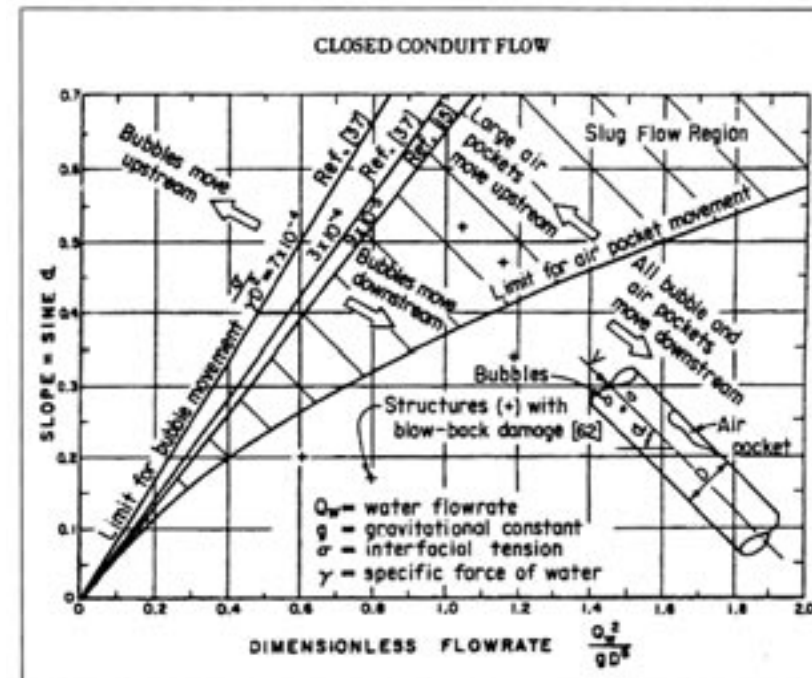
D_b = diameter van de luchtbel in m

α = hellingshoek van de leiding

C_b = zgn. 'drag coëfficiënt' van de luchtbel. ³⁰⁾



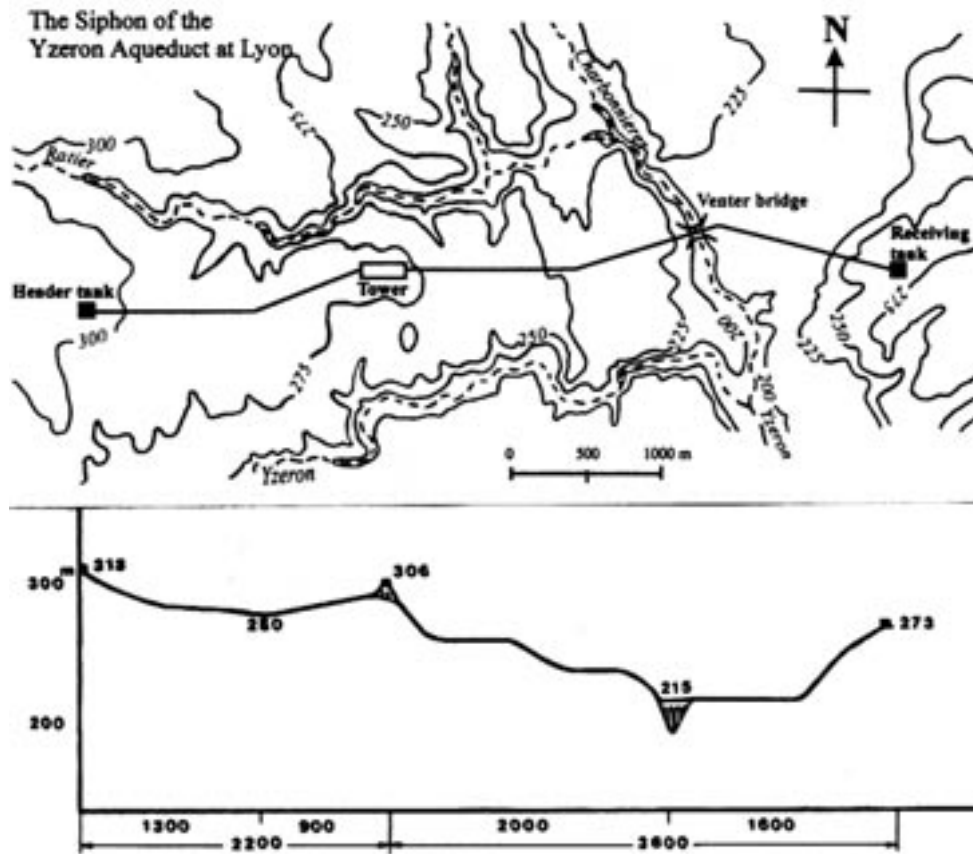
Figuur 32:
Stijgsnelheid van luchtzakken ('slugs') in hellende leiding. Maximum bij een helling van ongeveer 40 graden (naar Falvey 1980, 52).



Figuur 33:
Gedrag van luchtbelllen en luchtzakken in gesloten leidingen als functie van de hellingshoek (naar Falvey 1980, fig.29).

Hieruit volgt dat hoe groter de luchtbel, hoe sneller het water moet stromen om de luchtbel mee te voeren en hoe steiler de leiding, hoe moeilijker de luchtbelllen met de stroming mee gaan. Omdat de luchtbelllen zich aan de bovenzijde van de leiding zullen verzamelen, moet er gecorrigeerd worden voor het feit dat de stromingsnelheid van het water direct aan de wand minder groot is, hetgeen voor kleine luchtbelllen een groter effect heeft dan voor grote luchtbelllen. Het resultaat is dat de gemiddelde stromingsnelheid V_{m,cr}, waarboven kleine luchtbelllen worden meegevoerd, groter zal zijn dan voor grote luchtbelllen en dat V_{m,cr} zowel samenhangt met de diameter van de luchtbelllen D_b als met de diameter van de leiding D_c en de wandruwheid k van de leidingwand. ³¹⁾

De zaken worden toenemend complex als kleine luchtbelllen fuseren tot grotere luchtbelllen/luchtzakken. Van luchtzakken, ook wel 'slugs' genoemd, is bekend, dat de stijgsnelheid in hellende leidingen merkwaardigerwijze groter is dan in verticale leidingen, met een maximum bij ongeveer 40 graden hellingshoek (figuur 32). ³²⁾ In naar beneden hellende leidingen kan het voorkomen dat



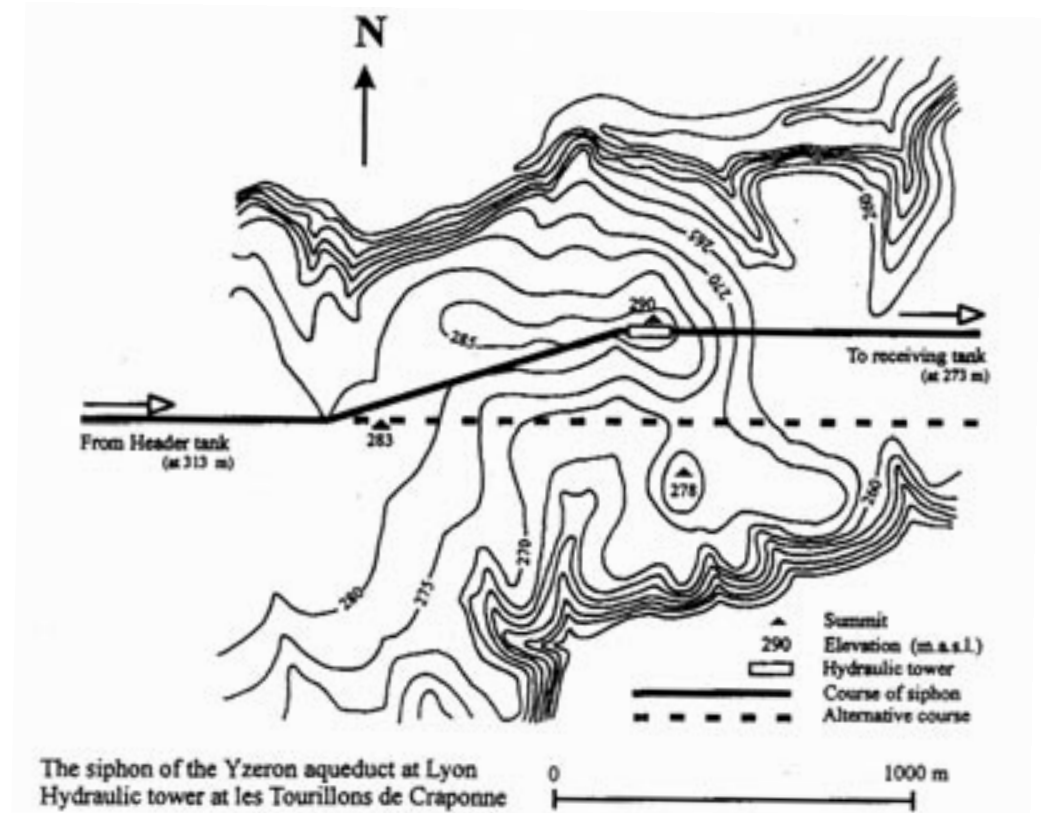
Figuur 34:
De sifon van het Yzeron aquaduct bij Lyon. Afstanden en hoogten in m.

slugs tegen de stroming in naar boven bewegen, een toestand die 'blow back' wordt genoemd. Dergelijke slugs kunnen aan de voorzijde kleine, met de stroming meegaande luchtbellens opnemen, terwijl aan de stroomafwaartse zijde van de slug weer luchtbellens aan het water kunnen worden afgegeven en met de waterstroom worden meegevoerd.³³⁾ Het gedrag van luchtbellens en slugs als functie van hellingshoek van de leiding en van de stromingssnelheid is weergegeven in figuur 33.

Wanneer de situatie van de Madradag-sifon in dit licht wordt gezien, dan kan worden aangenomen dat de luchtzakken automatisch uit de leiding werden uitgespoeld, omdat de hellingshoek van de leiding ter plekke van de instroom tank veel groter was dan stroomafwaarts van de hoge punten.

Lucht werd relatief moeilijk vanaf de instroomtank de leiding ingevoerd, maar relatief gemakkelijk aan de stroomafwaartse zijde van de luchtzakken bij de hoge punten weer meegenomen met het water. De sifon ontwikkelde zich na het opstarten tot volledige capaciteit. We kunnen ons natuurlijk afvragen of de ontwerpers van de Madradag-sifon zich hiervan wel bewust waren. Maar de sifon werkte zoals verwacht en bracht water naar de hoog gelegen acropolis, zonder twijfel tot grote verbazing en ontzag van haar bewoners.

Bij de Grezieux-Craponne-Lyon-sifon van het Yzeron-aquaduct (niet te verwarren met de Yzeron sifon van het Gier-aquaduct!) was echter sprake van een tegengestelde situatie. Ook hier was er een intermediair hoog punt in het leidingtraject,



Figuur 35:
Topografie ter plaatse van het hoge punt in de sifon van het Yzeron aquaduct.

dat in dit geval vanwege de topografie niet te vermijden was (figuur 34,35). Echter de helling van de leiding, direct stroomafwaarts van het hoge punt, was veel steiler dan bij de instroomtank. Lucht werd bij de instroomtank gemakkelijk de leiding in meegevoerd, maar slechts moeizaam vanaf de luchtzak weggevoerd.

Als we aannemen dat er een gesloten leiding over het gehele traject liep, inclusief het hoge punt, dan kan berekend worden dat het debiet bij het opstarten van de sifon, vanwege de luchtzak bij het hoge punt, slechts zestig procent van het maximale debiet kon halen. De sifon zou vervolgens na verloop van tijd tot volledige stilstand komen vanwege toename van het volume van de luchtzak door aanvoer van lucht vanaf de instroomtank.

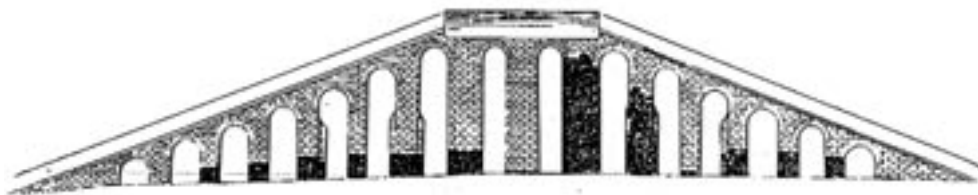
De Romeinen losten het probleem op door de leiding bij het hoge punt omhoog te voeren naar een nabij gelegen heuvel. Daarop bouwden zij een zestien meter hoge toren met boven op een open container en aan weerszijden schuin oplopende hellingbanen. De leidingen van de sifon (de sifon bestond uit meerdere parallelle loden leidingen) werden omhoog naar de open container gevoerd, om vervolgens weer af te dalen naar beneden verder het dal in. Zodoende kon de lucht ontsnappen en werd de vorming van een luchtzak vermeden. Door deze 'hydraulische toren' werd de sifon opgedeeld in twee achtereenvolgende sifons, van respectievelijk 2.200 meter (Grezieux-Craponne) en 3.600 meter lengte (Craponne-Lyon). In feite betreft het hier met 5.800 meter eigenlijk de langste sifon uit de Romeinse tijd. Van de hydraulische



Figuur 36:
Resten van de hydraulische toren, genaamd 'les Tourillons', zuid aanzicht, begin 1900 (Burdy 1996).



Figuur 37:
Resten hydraulische toren, genaamd 'les Tourillons', huidige toestand, noord aanzicht.



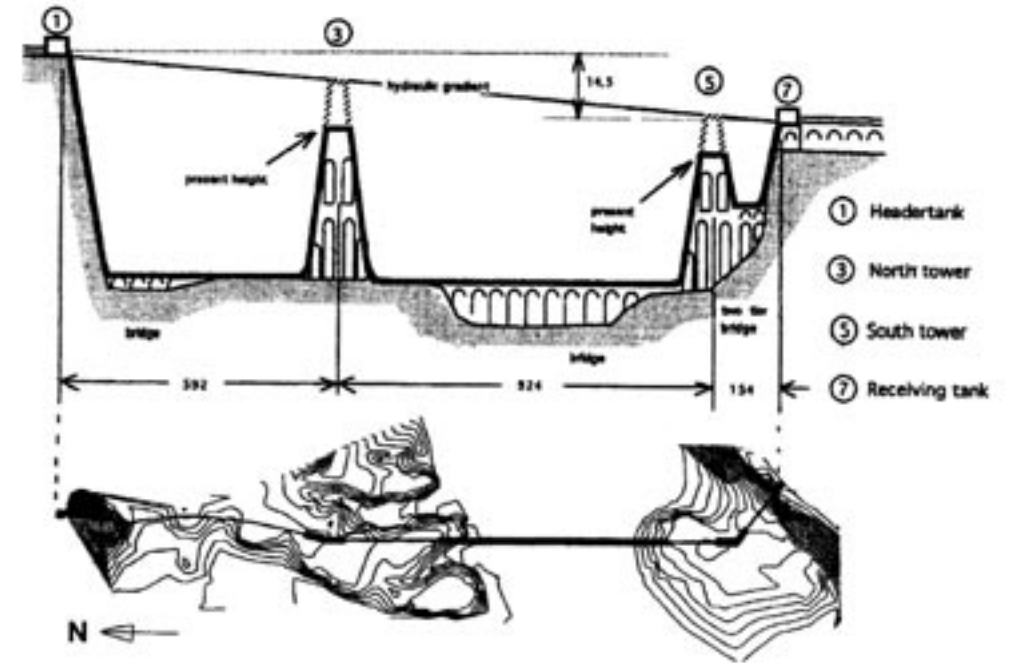
Figuur 38:
Reconstructie van de hydraulische toren 'les Tourillons' (Burdy 1996).

toren zijn nog twee grote pijlers bewaard gebleven, plaatselijk bekend als 'les Tourillons' (figuur 36-38).

De omtrekken van de andere pijlers zijn ter plekke nog in de bodem aan te treffen. De top van de toren zou volgens Burdy niet precies langs de hydraulisch gradiënt tussen in- en uitstroomtank hebben gelegen, maar daar iets bovenuit komen, hetgeen consequenties moet hebben gehad voor

het aantal en de diameter van de loden leidingen van de achtereenvolgende sifongedeelten.³⁴ Het drukverschil tussen de container op de toren en de uitstroomtank in Lyon werd hierdoor, voor het langste en moeilijkste gedeelte van de sifon, vergroot.

Er is nog een Romeinse sifon bekend, met zelfs twee hydraulische torens: de sifon van Aspendos,



Figuur 39:
Aspendos sifon, maten in m (naar Kessener 2003).



Figuur 40:
Aspendos sifon, noordelijke toren.



Figuur 41:
Aspendos sifon, detail noordelijke toren.
Zie persoon boven de boog.

aan de zuidkust van Turkije (figuur 39). In het traject van deze 1.670 meter lange en veertig meter diepe sifon zijn echter geen natuurlijke hoge punten opgenomen. Maar de stenen drukleiding werd ook hier over schuine hellingbanen van en naar open containers op de top van twee achtereenvolgende veertig meter hoge torens geleid (figuur 40-42).³⁵⁾

De torens liggen ter plekke van horizontale bochten in het traject van de sifon, 16 graden voor de noordelijk gelegen toren, 55 graden voor de zuidelijke toren. De open containers moeten op het niveau van de hydraulische gradiëntlijn tussen in- en uitstroomtank hebben gelegen.³⁶⁾ Het ligt echter niet voor de hand om dergelijke enorme torens te bouwen met noodzakelijkerwijs bovenop open containers om lucht te laten ontsnappen teneinde de doorstroming te garanderen, hetgeen niet nodig zou zijn geweest als er geen torens in het ontwerp zouden zijn opgenomen. De torens van Aspendos werden gebouwd om een andere reden, die evenwel ook met lucht te maken had.

Behalve luchtzakken bij hoge punten, die het debiet van de sifon kunnen reduceren en zelfs een volledige stop kunnen veroorzaken, kan lucht in drukleidingen oorzaak zijn van waterslag effecten. Waterslag ('water hammer') kan worden gedefinieerd als een 'drukverhoging ten gevolge van een substantiële en plotselinge verandering van de stromingsnelheid van het water', bijvoorbeeld door het snel sluiten van een klep. Waterslag ligt aan de basis van de 18e-eeuwse uitvinding van de 'hydraulische ram'. Hiermee kan, gebruik makend van een zich herhalende automatische sluiting van een klep, een gedeelte van water dat van enige hoogte h naar beneden valt worden opgevoerd naar een grotere hoogte, tien tot veertig keer deze hoogte h .³⁷⁾

Antieke drukleidingen waren niet uitgerust met kleppen of afsluiters. Maar waterslag kan ook het resultaat zijn van enkel de aanwezigheid van lucht in de leiding door interactie van lucht met de waterstroom, (38) of, en met name, indien lucht kan ontsnappen via lekpunten. Wanneer in een leiding onder druk een luchtbel die met de waterstroom wordt meegevoerd een lekpunt passeert, kan er lucht naar buiten treden. Omdat de gecompriëerde lucht veel sneller uit de leiding ontsnapt dan een gelijk volume van het veel zwaardere water, zal de waterkolom achter de luchtbel worden versneld zolang de lucht ontsnapt, waarna weer vertraging optreedt. De grootte van de drukgolf die hierdoor ontstaat kan met de wet van Joukowsky worden ingeschat:

$$dH = 0,5 \cdot c \cdot dV \cdot g^{-1} \quad (6)$$

met:

dH = druk verhoging in m water kolom

c = geluidssnelheid in water ~ 1000 m/sec

dV = verschil in stromingssnelheid van het water stroomopwaarts van het lek juist voor en juist na het ontwijken van lucht uit de leiding,

g = versnelling van de zwaartekracht
= $9,81$ m/sec².³⁹⁾

dV kan worden bepaald uit continuïteitsoverwegingen, aangezien de afname van het volume van lucht in de leiding gerelateerd is met de uitstro-



Figuur 42:
Aspendos sifon, zuidelijke toren, met in de verte de grote sifonbrug en de noordelijke toren.

ming van de gecompriëerde lucht door de lekopening:

$$dV \cdot A_c = V_a \cdot A_h \quad (7)$$

met:

A_c = doorsnede van de leiding in m²

V_a = snelheid van de gecompriëerde lucht die ontsnapt door de lekopening in m/sec,

A_h = doorsnede van de lekopening in m²

V_a wordt bepaald door de karakteristieken van luchtstroming door kleine openingen onder hoge druk.⁴⁰⁾ Voor een lekopening van bijvoorbeeld twaalf millimeter doorsnede, bij een druk van veertig meter waterkolom (ongeveer 400 kPa) is de luchtstroom door de opening zo'n 0,05 kubieke meter per seconde. Dit resulteert in een snelheid van de ontsnappende lucht van 440 m/sec, dit wil zeggen: supersonisch (geluid).

Derhalve is, $dV = V_a \cdot A_h \cdot A_c^{-1} \approx 0,8 \text{ m/s}$

zodat $dH = 0,5 \cdot 1000 \cdot 0,8 / 9,81 = 39$ m waterkolom.

Dit betekent dat voor de veertig meter diepe Aspendos-sifon, afgezien van factoren die een dempend effect kunnen hebben, zoals de aanwezigheid van lucht in de rest van de leiding, waterslag als gevolg van ontsnappende luchtbellens uit de leiding door een lekopening van twaalf millimeter aanleiding kan vormen tot plotselinge drukverhogingen van bijna honderd procent. Lekpunten waren met name bij stenen leidingen niet te vermijden. Dit kwam omdat tijdens de constructie van de drukleiding de verbindingen tussen de stenen pijpblokken werden ingesmeerd met het expanderende afdichtingmateriaal, waarna de blokken tegen elkaar moesten worden geschoven.

Een deugdelijke controle op afdichting was niet mogelijk. Het enige dat men kon doen was de naad aan de binnenzijde van de pijp afsmeren, voordat het volgende blok werd geïnstalleerd. Eerst bij het vullen en ingebruikname van de sifon werd de kwaliteit van de afdichtingen duidelijk. Uit

overvloedige kalkafzettingen onder een van de bogen van de meer dan vijfhonderd meter lange sifonbrug tussen de twee torens van de Aspendos-sifon is op te maken dat deze sifon inderdaad flink gelekt moet hebben.

Het ontsnappen van de gecompriëerde lucht uit de leiding ging gepaard met sissende geluiden en spetteren van water, hetgeen ongetwijfeld indruk zal hebben gemaakt op de voorbijganger die hierdoor bewust werd van de hoge druk in de leiding. De opgewekte drukgolf verplaatste zich in beide richtingen door de leiding, en bij de bochtelementen veroorzaakte de drukgolf een plotse toename van krachten die ze uit hun positie neigen te drukken, bovenop de al aanwezige krachten als gevolg van de statische druk.

Vanwege reflecties van de drukgolf aan andere luchtbellen in de leiding (grensvlak lucht-water) kunnen opslingerende effecten ontstaan, waardoor nog hogere drukmomenten voor konden komen. Dergelijke toenames konden herhaaldelijk optreden en tenslotte de krachten, die de leiding intact moesten houden, overstijgen. Een kleine verplaatsing van een bochtelement zou leiden tot barsten van de afdichtingen ter plekke en het ontstaan van een extra lekpunt, waardoor de instroom van water bij het begin van de sifon toenam en dus ook die van lucht, zodat waterslag vaker kon gaan optreden.

Het lek kon tenslotte zo groot worden dat het water sneller de sifon instroomde dan dat het aquaduct kon aanvoeren, zodat periodiek grote luchtzakken in de leiding konden ontstaan. De sifon kwam zo in de laatste fase van zijn destructie, waarbij al het water dat de sifon instroomde door het nieuwgevormde lek uittrad, afgewisseld met gecompriëerde lucht, die luidruchtig uit de leiding ontsnapte.

Het opstarten van een sifon, met of zonder hoge punten, maar speciaal van de cat. II-sifons, moest dus met de grootste voorzichtigheid gebeuren, aangezien dit soort problemen gemakkelijk konden ontstaan als niet eerst alle lucht langzaam uit de sifon werd gedreven. Bij een ongecontroleerd opstarten, wanneer grote hoeveelheden water plotseling de leiding in werden geleid, konden grote luchtzakken ontstaan. die toenemend

gecompriëerd werden, vooral in het meer horizontale, lage gedeelte van de sifon.

Deze luchtzakken bewogen mee met de waterstroom en hadden, gearriveerd in het opstijgende been van de sifon, de neiging om sneller dan het water naar boven te bewegen. Water stroomde onder de luchtzakken door terug naar beneden, waardoor weer drukverhogingen ontstonden en aan het einde van de sifon konden krachtige expansies van lucht en water optreden. Deze processen bedreigden op zich al de integriteit van de leiding. Verder konden tijdens een onzorgvuldig uitgevoerde vulprocedure oscillaties van de waterkolom ontstaan, die bijdroegen aan krachten die op de leidingelementen werden uitgeoefend.⁴¹⁾

Bij Aspendos werden de twee 'hydraulische torens' gebouwd ter plekke van horizontale bochten in het traject van de sifon. Hierdoor werd deze sifon opgedeeld in drie achtereenvolgende sifons, waardoor de bochten als het ware uit de sifon werden gehaald. Zo werd schade aan deze twee categorie leiding door de statische druk en, belangrijker nog, door waterslag, voorkomen. De beslissing van de Romeinse ingenieur om horizontale bochten in het traject van deze sifon te plannen, leidde tot het opnemen van de torens in het ontwerp. De torens moesten dan wel bovenop worden uitgerust met open tanks, om de lucht bij deze artificiële hoge punten te laten ontsnappen. Uit topografische overwegingen kan worden afgeleid dat de sifon voor het gekozen traject, mét horizontale bochten én de bouw van deze enorme torens, toch goedkoper was dan voor een traject zonder bochten en zonder torens.⁴²⁾

Vitruvius

De Romeinse architect Vitruvius (25 v.Chr.) behandelt in het achtste boek van zijn tien boeken over architectuur ('De Architectura Libri Decem') de Romeinse watertransportmethoden.⁴³⁾ Hij beschrijft ook de techniek van de sifons en de problemen die daarbij voorkomen en doet voorstellen hoe deze problemen op te lossen. Hij adviseert het opstarten van sifons zeer voorzichtig uit te voeren, omdat er anders een 'zeer hevige lucht(druk)' (vehemens spiritus) kon ontstaan die de leidingen uit zijn voegen kon drukken.

Vóór het opstarten van tweede categorie sifons

wordt aangeraden als in de leiding te brengen, om eventuele lekken te dichtten. Deze dichtingmethode, die werkt op grond van expansie van droog organisch materiaal dat opzwellt en in het lek blijft zitten, heeft tot in onze tijd voortbestaan in de vorm van middelen om lekkende autoradiatoren te dichtten. Voor de antieke sifons was echter niet zozeer het wegglekken van water het probleem, alswel de waterslageffecten als gevolg van lucht die door de lekpunten kon ontsnappen. Hierdoor kwam het gehele systeem in gevaar.

Vitruvius adviseert verder 'colliquaria' op te nemen in de sifons, voorzieningen om lucht te laten ontwijken (colliquaria facienda sunt, per quae vis spiritus relaxetur). Het woord colliquaria komt verder niet voor in de gehele latijnse literatuur, zodat de ware betekenis/vertaling onduidelijk is. Er is, én wordt, heel wat over gespeculeerd.⁴⁴⁾ Maar uit de tekst van Vitruvius en uit hydraulische overwegingen hierboven geschetst is duidelijk dat gerefereerd wordt aan voorzieningen om lucht te laten ontsnappen, teneinde de continuïteit van de waterstroom te garanderen.⁴⁵⁾

Bespreking

De problemen die aan de orde waren bij de antieke drukleidingen werden veroorzaakt door statische druk en, belangrijker, door de effecten van de aanwezigheid van lucht in de leiding, bij het opstarten van de sifon en tijdens operationeel gebruik. De aard van de problematiek is gerelateerd aan de eigenschappen van de leidingen, samengesteld uit homogeen materiaal (gesoldeerde loden leidingen (cat.I) dan wel uit niet-homogene materialen (leidingen opgebouwd uit losse elementen van steen, terracotta etc.(cat.II)).

De archeologische bevindingen tonen aan dat de klassieke ingenieurs bekend waren met deze problematiek en hiermee wisten om te gaan. Voor de cat. I-sifon van het Yzeron-aquaduct bij Lyon werd een hydraulische toren gebouwd ter plekke van een hoog punt, om lucht te laten ontsnappen zodat de waterstroom niet door de aanwezigheid van een luchtzak kon worden geblokkeerd. In de cat. II -sifon van Aspendos werden twee hydraulische torens opgenomen ter plekke van horizontale bochten in het traject, om schade aan de leiding vanwege statische druk en waterslag te voorkomen. Voor de antieke sifons was alleen de zwaar-

tekracht als drijvende kracht beschikbaar, waardoor het drukverschil tussen begin en eind van de sifons niet zeer groot kon worden. Problemen door luchtinsluiting werden hierdoor snel duidelijk.

In moderne systemen, met hoge drukpompen en leidingen van superieure kwaliteit, kunnen dergelijke problemen lange tijd onopgemerkt blijven en de hydraulische ingenieur confronteren met onverkleerde capaciteitsafname. De principes die aan moderne drukleiding systemen ten grondslag liggen, verschillen echter niet van die in de antieke tijd: de wetten der natuur zijn onveranderlijk. ■

VOETNOTEN

- 1) Drs. H. Paul.M. Kessener, van Slichtenhorststraat 13, NL-6524 JH Nijmegen, the Netherlands, email: lenl@euronet.nl.
- 2) Zie het artikel van Kamma en van Zijl, 2002.
- 3) Hoewel dikke en onregelmatig gevormde biofilms tot een reductie van pijpdiameter en dus van capaciteit kunnen leiden.
- 4) Sommige aquaducten voerden water aan enkel ten behoeve van watermolens. Bij Barbegal, 2 km ten zuiden van Fontvieille (noord-oost van Arles) zijn de resten van een molencomplex bestaande uit 16 watermolens aangetroffen. Deze 'vertical wheel' molens waren in 2 series van 8 telkens onder elkaar opgesteld zodat het water afkomstig van de ene molen de daaropvolgende molen aandreef. Het complex was gelegen op de helling van een lage heuvelrug en werd van water voorzien door een eigen aquaduct. Zie ondermeer Sellin 1983 en Hodge 1990. Voor een overzicht van de geschiedenis van watermolens zie Reynolds 1983.
- 5) Hodge 1992, 1.
- 6) Voor nymphaea, die vooral in Klein Azië in zwang waren, zie bijv. Dorl-Klingenschmid 2001. De nymphaea hadden soms grote afmetingen. Het nymphaeum van Aspendos, een relatief kleine stad aan de zuidkust van Turkije, bestond uit een stenen wand, 30 m breed, 15 m hoog, en 1,5 m dik, met marmer bekleed en rijk geornamenteerd met waterspuwers en standbeelden. Deze nymphaea vormden het object van de rivaliteit tussen steden; zo stak men elkaar de loef af. In het westen zien we vooral castella divisoria, verdeelstations. Twee ervan zijn in redelijk goede staat bewaard gebleven en bieden inzicht in de distributie technieken van de Romeinen: het castellum van Nîmes, eind punt van het aquaduct van Nîmes, en het castellum van Pompeii. Zie voor Nîmes: Kessener 1995, Fabre et.al. 2000. Voor een recente studie van het castellum van Pompeii zie Ohlig 2002 en 2003.
- 7) Zie bijvoorbeeld Grewe 1985, 1998.
- 8) Dit was niet altijd het geval. In de 1e helft van de 2e eeuw n. Chr. werd een 17 km lang aquaduct geconstrueerd voor het antieke Saldae, het huidige Bejaja in Algerije. Om een heuvelrug te passeren moest een 428 m lange tunnel geconstrueerd worden. Dit deed men door van twee kanten naar elkaar toe te graven, maar op gegeven moment was het totaal van de gegraven afstanden langer dan de heuvelrug breed was. Toen is de hulp ingeroepen van de Romeinse leger-ingenieur Nonius Datus, die het probleem wist op te lossen. Dit feit is in een uitgebreide inscriptie vastgelegd welke nu voor het stadhuis van Bejaja staat opgesteld. In de inscriptie springen drie trefwoorden naar voren. Patientia, Virtus, en Spes: geduld, deugd/daadkracht, en hoop/vertrouwen, eigenschappen die door Nonius Datus als kenmerkend voor een deskundig ingenieur werden beschouwd. Een kopie van de inscriptie bevindt zich in het Museo della Cività te Rome, een andere in het Museum für antike Schifffahrt in Mainz. Zie de Waele 1996, Grewe 2002.
- 9) Voor Constantinopel zie Cecen 1996; Carthago: Rakob 1983; Keulen: Haberey 1972, Grewe 1986 en 1988; Rome: van Deman 1934, Ashby 1935, Blackman 1978; Lyon: Burdy 2002; Pergamon: Garbrecht 1987; Nîmes: Fabre 2000; Cherchel: Leveau/Paillet 1976; Arles: Leveau 1996.
- 10) Binnenmaten van het kanaal van de Aqua Marcia (Rome): 90x240 cm (bxh); kanaal van het Brevenne aquaduct (Lyon) 80x180 cm; Carthago 85x190 cm; Nîmes 120x166 cm; Keulen 70x142 cm; Aspendos (Turkije): 50x90 cm; Mont d'Or (Lyon) 44x71 cm; Patara (Turkije): 40x35 cm.
- 11) Rakob 1983.
- 12) zie Malinowski 1979, 1996.
- 13) Het 120 cm brede aquaduct van Nîmes heeft kalkafzettingen (sinter) tot 50 cm dik als teken van vele eeuwen onafgebroken gebruik. Grote blokken sinter werden later hergebruikt in de constructie van bouwwerken. De aquaducten van Lyon daarentegen zijn geheel niet verkalkt. De kalkafzettingen in het aquaduct van Keulen waren daarentegen van zeer goede kwaliteit. De resten van het Keulse aquaduct werden in de Middeleeuwen als steen groeve gebruikt. De met ongeveer 1 mm per jaar tot 30 cm aangegroeide kalkafzettingen werden in lange stukken uitgenomen en verwerkt tot zuilen en altaarplaten. Door polijsten werd een gevarieerde op travertijn lijkende structuur zichtbaar die een afspiegeling was van de jaarlijkse en door de seizoenen beïnvloede kalkafzettingen. Het werd als waardevol materiaal beschouwd en tot in Engeland en Denemarken verhandeld. In diverse kerken rond Keulen zijn een aantal zuilen en altaarstukken van dit zgn. Aquadukt-Marmor nog te vinden, bv in Kreuzweingarten bij Euskirchen (figuur 10). In de balustrade van de koorgang in de grote Luidina kerk te Deventer zijn een aantal grote sinterplaten opgenomen. In de St. Servaas te Maastricht zijn ook een aantal zuiltjes van Aquadukt-Marmor aangetroffen. Onbewerkte sinterplaten uit het aquaduct van Aspendos werden gebruikt als grafstenen op lokale Seljukse begraafplaatsen. Zie ook Grewe 1992.
- 14) De Pont du Gard is met meer dan 49 m de hoogste aquaductbrug uit de Romeinse tijd. De brug is tegenwoordig na uitgebreide herstelwerkzaamheden wel te bezichtigen maar niet meer te betreden. Het kanaal stroomafwaarts en stroomopwaarts van de brug kan over enige afstand gevolgd worden.
- 15) De gradiënt van een sectie van het Aspendos kanaal wordt geschat op 140-150 m/km (Kessener 2000). Het aquaduct van Carthago is het enige Romeinse aquaduct dat nu nog, voor een deel, in functie is. Het wordt door de overheid onderhouden en vervoert water (1995: 150 l/sec) over een afstand van ongeveer 70 km, ten behoeve van lokale gebruikers en voor de watervoorziening van Tunis (figuur 14).
- 16) Schut 2002.
- 17) Voor verdere gegevens met betrekking tot Smyrna: Weber 1899; Lyon: Burdy 1991, 1996, 2002; Pergamon: Fahlbusch 1982, Garbrecht 1978; Alatri: Laurenti 1987, Lewis 1999; Aspendos: Kessener & Piras 1997, Kessener 2000; Termini Imerese: Belvedere 1986; Oinoanda: Stenton & Coulton 1986; Laodikeia (Turkije, bij Pamukkale): Weber 1898; Patara: Stenton & Coulton 1986. Voor antieke sifons in het algemeen zie bijvoorbeeld Smith 1976, Hodge 1985.
- 18) Van de Kara Bunar sifon van Smyrna is als gevolg van de enorme groei van Izmir vrijwel niets meer aan te treffen. Tijdens een bezoek in 2003 vond ik slechts twee leidingstenen, naast een huis ter plekke van het traject van de sifon waar nu een weg loopt. Van de Madradag sifon (2e eeuw v.Chr.) is het traject van instroomtank tot aan de akropolis vrijwel niet door moderne ingrepen verstoord. De route is in principe, over soms nogal moeilijk toegankelijk terrein, volledig na te lopen, waarbij men ook bruggen van latere Romeinse aquaducten passeert.
- 19) Hodge 1992, 156.
- 20) Voor Romeinse soldeertechniek zie bijvoorbeeld Hodge 1992, 307 ff.
- 21) De pijpleidingen waren, afhankelijk van de water kwaliteit, evenzeer als de open kanalen onderworpen aan kalkafzettingen, waardoor de vrije opening in de loop der jaren verminderde. Deze incrustaties konden een merkwaardige ovale vorm aannemen. Aan de bovenzijde van de leiding kon verminderde afzetting plaatsvinden wegens meenemen van lucht in de leiding, aan de onderzijde door meegevoerd materiaal zoals zand en steentjes (figuur 25). De naar schatting 3000 leidingstenen van de Aspendos sifon werden,

nadat de sifon waarschijnlijk als gevolg van een aardbeving in onbruik was geraakt, door de Romeinen hergebruikt voor de bouw van een brug over de nabij gelegen Eurymedon rivier. De Seldjuken hebben eeuwen later op de ruïnes hiervan weer een brug gebouwd, die nog staat. De leidingstenen zijn nog te zien in de Seldjukse brug en de resten van de Romeinse brug (Grewe/Kessener/Piras 1999).

22) Malinowski 1979, 1996.

23) Hansen 1992. Een 90 cm lang loden pijpstuk, diameter 31-34 cm en met inscriptie, is het enige dat rest van een vondst van ongeveer 10 ton loden leiding in de Rhône bij Vienne, in 1980 bij extreem lage waterstand. De pijpen zijn helaas zonder dat onderzoek kon worden gedaan 'gerecycled' (vermolten). De vondst toont aan dat de Rhône hier ook door middel van een sifon werd overgestoken (Burdy and Cochet 1992).

24) Theoretisch kan een leiding op 2 manieren barsten: in de lengte of loodrecht op de leiding-as. De minimumdruk $P(l)$ om de pijp langs de lengte-as te doen barsten bedraagt: $P(l) = t(p) \cdot d/R$, met $t(p)$ = treksterkte van het materiaal van de pijpwand loodrecht op de lengte-as van de pijp, d = dikte van de pijpwand, R = diameter van de leiding. De druk $P(p)$ nodig om de pijp loodrecht op zijn lengte-as te doen barsten is: $P(p) = 2 \cdot t(l) \cdot (d/R) \cdot (1+d/R)$, met $t(l)$ = treksterkte van het materiaal van de pijpwand parallel aan de lengte as. Voor homogene pijpen geldt $t(p) = t(l)$, waaruit volgt dat $P(p) > 2 \cdot P(l)$. Homogene leidingen zullen dus altijd overlans barsten als de interne druk te hoog wordt. Voor niet-homogene leidingen, met $t(p) \neq t(l)$, is dit niet vanzelfsprekend.

25) Fahlbusch 1982, 73.

26) Een stromingsnelheid die evenwel vergelijkbaar is met die in de AWP tussen Moerdijk en Bath (Kamma en van Zijl 2002,61).

27) $F = dP/dt = (2 \cdot \rho \cdot A \cdot dx \cdot v \cdot \sin(\alpha/2)) / dt$

$= 2 \cdot \rho \cdot A \cdot (dx/dt) \cdot v \cdot \sin(\alpha/2) = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \sin(\alpha/2)$.
Met $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$: $F = 2 \cdot 1000 \cdot \pi/4 \cdot (0.28)^2 \cdot (1) \cdot 2 \cdot \sin(27.5^\circ) = 57 \text{ N}$.

28) De afvoerende pijp van de instroomtank van de Madradag sifon lag op geringe diepte onder de bovenrand van de ruim 2 m diepe tank (figuur 30). De inname van lucht in de leiding met het water was hierdoor niet te voorkomen. Meenemen van lucht bij inname punten is in het algemeen een moeilijk te verhinderen probleem, zie bijv. Knauss 1983. De instroom tank van de Madradag sifon is gedeeltelijk verstoord maar wel te inspecteren.

29) Men kan zich afvragen waarom het traject van de Madradag sifon over de top van de intermediaire heuvels loopt en niet erom heen gaat zodat de hoge punten vermeden werden. De statische druk werd weliswaar vanwege het traject over de heuveltoppen zo gering mogelijk gehouden, maar waarschijnlijker is dat het traject werd gekozen om schade door omgevingsfactoren te voorkomen. Over het gehele gekozen traject helt het terrein aan weerszijden van de pijpleiding naar beneden. Zo kon er bij grote regenval geen schade ontstaan door turbulente waterstromen. De leiding verloopt als het ware over de lokale waterscheiding.

30) Falvey 1980, 48. De waarde van C_b wordt meestal voor gemak op 1 gesteld. Vergelijk met de formule voor de minimum snelheid om luchtbellen mee te nemen vermeld in het artikel van Kamma en van Zijl (p.56): $V_{min} = 1,23 \cdot (g \cdot D_b \cdot \sin \alpha)^{1/3}$.

31) $V_{m,cr} = ((\log(3,4 \cdot D_c/k)) / (\log(15,1 \cdot D_b/k))) \cdot (4 \cdot g \cdot D_b \cdot \sin \alpha)^{1/3}$, met D_b = diameter van de luchtbel, D_c = diameter van de leiding, en k = wandruwheid (Aksoy 1997).

32) Falvey 1980, 50 / 61-65.

33) Baines/Wilkinson 1986.

34) Burdy 1991.

35) De torens, die behoren tot de hoogste bouwwerken uit de Romeinse tijd, zijn gelegen aan de noordzijde van de acropolis van Aspendos (50 km ten oosten van Antalya). In het centrale gedeelte van de torens is een trap opgenomen die oorspronkelijk tot boven in de torens liep. De trappen zijn nog intact tot een hoogte van 15 m en kunnen, met enige omzichtigheid, bestegen worden vanwaar een indrukwekkend uitzicht over de omgeving verkregen wordt.

36) Men kan berekenen dat wanneer er over de torens, bij de huidige hoogte van ruim 28 m, een gesloten leiding zou lopen, de sifon niet zou kunnen opstarten vanwege de luchtzakken. De torens waren oorspronkelijk hoger, en dus moest de vorming van luchtzakken worden voorkomen, zodat de toppen van de torens om de lucht te laten ontsnappen uitgerust moeten zijn geweest met open containers, die dan op de hydraulische gradiënt-lijn hebben moeten liggen.

37) Stern 1983, 177-179.

38) Schnappauf 1966

39) Bij automatisch werkende ontluchters is sprake van een gelijksoortig probleem. De waterslag die hierbij kan optreden kan worden beperkt door juiste keuze van de dimensies van de opening waardoor de lucht kan ontsnappen, zie bijvoorbeeld Falvey 1980, 57-77.

40) Falvey 1980, figuur 45.

41) Zie Ortloff and Kassinos 2003. Ortloff c.s. behandelen voornamelijk opstartproblemen en voeren aan dat de Aspendos torens gebouwd werden om de sifon in 3 stukken op te delen en de lengte per sifongedeelte te reduceren. Zo zouden er minder problemen zijn tijdens de opstartfase vanwege oscillaties van het water. Zij geven echter geen verklaring waarom de torens op horizontale bochten in het traject zijn gebouwd, en evenmin geven zij een verklaring voor het bestaan van

veel langere sifons, zonder torens.

42) Zie Kessener 2000. Het Aspendos aquaduct en zijn sifon werden onderzocht tijdens veldwerkcampagnes in 1996 en 1998 door S.A.G. Piras en de auteur. Toestemming voor het onderzoek werd verkregen van het Ministerie van Cultuur te Ankara. De campagnes werden ondersteund door NWO, Pol Geotechniek te Heteren (apparatuur, dhr. W. van Kan), Virtus Architects te Nijmegen (verwerken van data) en Delft Hydraulics (hydraulische analyse, Ir. J. Wijdieks, Ir. R. Lemmens). De resultaten van het onderzoek werden in 1997 en 1999 tijdens het 19e en 21e International Symposium of Archaeological Surveys and Excavations te Ankara gepresenteerd.

43) Voor een recente Nederlandse vertaling van Vitruvius zie Peters 1997.

44) Zie bijvoorbeeld Falhbusch/Peleg 1992, Lewis 1999, Kessener 2001.

45) Kessener 2003. Er zijn naar aanleiding van de bevindingen van HWB recentelijk door het Waterloopkundig Laboratorium te Delft experimenten over het gedrag van luchtinsluitingen en gasbellen in stijgende en dalende watervoerende leidingen met hoge punten opgestart.

LITERATUUR

- Ashby, Th. 1935, *the Aqueducts of ancient Rome*, Oxford.
- Aksoy, S. 1997, Gedanken über Luftblasen in Druckleitungen, Mitt. des Leichtweiss-Institut für Wasserbau, unpublished thesis.
- Baines, W.D. and Wilkinson, D.L. 1986, The motion of large air bubbles in ducts of moderate slope, *Journal of Hydraulic Research* 25, 157-169.
- Belvedere, O. 1986, *L'Acquedotto Cornelio di Termini Imerese*, Rome.
- Blackman, Deane R. 1978, The volume of water delivered by the four great aqueducts of Rome, *Publications of the British School at Rome (PBSR)* 46, 52-72.
- Burdy, J. 1991, *L'Aqueduc Romain de l'Yzeron*, Lyon.
- Burdy, J. 1996, *L'Aqueduc Romain du Gier*, Lyon.
- Burdy, J. 2002, *Les Aqueducs romains de Lyon*, Lyon.
- Burdy, J. and Cochet, A. 1992, Une date consulaire (213 après J.-C.) sur un tuyau de plomb viennois, *Gallia* 49, 89-97.
- Çeçen, K. 1996, The longest Roman Water Supply Line, Istanbul.
- Corcus, G. 1989, *Air in Water Pipes*, Berkeley.
- Demian van, E. 1934, *The Building of the Roman Aqueducts*, Washington.
- Dorl-Klingenschmid, C. 2001, Prunkbrunnen in Kleinasiatische Städten, *Bayrische Akademie der Wissenschaften, Studien zur Antiken Stadt* 7, München.
- Fabre, G., Fiches, J.-L., Paillet, J.-L. 2000, *L'Aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard*, 2nd edition, Paris.
- Fahlbusch, H. 1982, Vergleich antiker griechischer und römischer Wasserversorgungsanlagen, Mitt. des Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Heft 73.
- Fahlbusch, H. and Peleg, J. 1992, Die Collivaria Vitruvs, Möglichkeiten der Interpretation, Mitt. des Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Heft 117, 105-140.
- Falvey, H.T. 1980, Air-Water flow in Hydraulic structures, *Engineering Monograph no. 41*, Denver.
- Garbrecht, G. 1978, Die Wasserversorgung des antiken Pergamon, die Druckleitung, in: Mitt. des Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Heft 60.
- Garbrecht, G. 1987, Die Wasserversorgung des antiken Pergamon, in: *Die Wasserversorgung antiker Städte*, 13-47, Vol. II, reprint 1991, Mainz am Rhein.
- Grewe, K. 1985, Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen (Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, Suppl. Bd. 1), Wiesbaden.
- Grewe, K. 1986, Atlas der römischen Wasserleitung nach Köln, Keulen.
- Grewe, K. 1988, Der Römerkanal-Wanderweg, Düren.
- Grewe, K. 1992, Aquädukt Marmor, Kalksinter der römischen Eifelwasserleitung als Baustoff des Mittelalters, Stuttgart.
- Grewe, K. 1998, Licht am Ende des Tunnels, Mainz.
- Grewe, K. 2002, Der antike Vermessungsingenieur Nonius Datus und sein Platz in der Geschichte der Technik, *Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft* 25, 39-52.
- Grewe, K., Kessener, H.P.M., Piras, S.A.G. 1999, Im Zickzack-Kurs über den Fluß, die römisch/seldschukische Eurymedon-Brücke von Aspendos (Türkei), *Antike Welt* 30, 1999, 1-12.
- Haberey, W. 1972, Die römischen Wasserleitungen nach Köln, Bonn.
- Hansen, J. 1992, Die antike Wasserleitung unter der Rhône bei Arles. Mitt. des Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Heft 117, 470-531.
- Hodge, A.T. 1985, Siphons in Roman Aqueducts, *Publications of the British School at Rome (PBSR)* 51.
- Hodge, A.T. 1990, A Roman factory, *Scientific American* 262-11, 106-111.
- Hodge, A.T. 1992, *Roman Aqueducts and Watersupply*, London.
- Kamma, P.S., van Zijl, F.P. 2002, De weerstand in persleidingen voor afvalwater tijdens de gebruiksfase, *Rioleringswetenschap* 5, 45-64.
- Kessener, H.P.M. 1995, The entrance channel of the castellum divisorium at Nîmes, *Bulletin voor Antieke Beschaving (BABesch)* 70, 179-191.
- Kessener, H.P.M., Piras, S.A.G. 1997, The pressure line of the Aspendos Aqueduct, *Adalya II*, 159-187.
- Kessener, H.P.M. 2000, The Aqueduct at Aspendos and its inverted siphon, *Journal of Roman Archaeology* 13, 105-132.
- Kessener, H.P.M. 2001, Vitruvius and the Conveyance of Water, *Bulletin voor Antieke Beschaving (BABesch)* 79, 139-158.
- Kessener, H.P.M. 2002, Vitruvius rehabilitandus est, *Proceedings of the 11th Int.Congress on the History of Water Management and Hydraulic Engineering in the Mediterranean Region*, 187-200.
- Kessener, H.P.M. 2003, Roman Watertransport: Problems in Operating Pressurized Pipeline Systems, *Wasserhistorische Forschungen, Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft*, Band 2, 147-160.
- Knauss, J. 1983, Wirbelbildung an Einlaufwerken – Luft- und Dralleintrag, *Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.. (DVWK)* 63, Bonn.
- Laurenti, M.C. 1987, Brevi note su alcuni rinvenimenti a Monte Daielli di Alatri, *Archeologia Laziale* 8, 302-306.
- Leveau, Ph. 1996, The Barbegal water mill in its environment: archaeology and the economic and social history of antiquity, *Journal of Roman Archaeology* 9, 137-153.
- Leveau, Ph., Paillet, J.-L. 1976, *L'alimentation en eau de Caesarea de Mauretanie et l'aqueduc de Cherchel*, Paris.
- Lewis, M. 1999, Vitruvius and Greek Aqueducts, *Publications of the British School at Rome (PBSR)* 67, 145-172.
- Malinowski, R. 1979, Concretes and Mortars in Ancient Aqueducts, *Concrete International*, January 1979, 66-75.
- Malinowski, R. 1996, Dichtungsmörtel und Betone in der Antike, *Proceedings of the 9th International Conference on the History of Watermanagement and Hydraulic Engineering in the Mediterranean Region*, N. de Haan and G. Jansen (ed.), Leiden.
- Ohlig, Chr. P.J. 2000, *De Aquis Pompeiorum*, thesis, Nijmegen.
- Ohlig, Chr. P.J. 2003, Technische Einrichtungen zur Wasserverteilung im Castellum Aquae von Pompeji, in: *Wasserhistorische Forschungen, Schwerpunkt Antike*, ed. Deutsche Wasserhistorische Gesellschaft DWhG, Siegburg, 213-226.
- Ortloff C.R., Kassinos A. 2003, Computational fluid dynamics investigation of the hydraulic behavior of the Roman siphon system at Aspendos, *Journal of Archaeological Science* 30, 417-428.
- Peters, T. 1997, *Vitruvius*, handboek bouwkunde, Amsterdam.

Rakob, F. 1983, Das Quellenheiligtum in Zaghouna und die römischen Wasserleitung nach Karthago, Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts 81, 41-88.

Reynolds, T.S. 1983, Stronger than a Hundred Men, Baltimore/London.

Schut P. 2002, Ein Aquädukt für das römische Nijmegen? Neue Ergebnisse archäologischer Prospektion. Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft 25, 121-133.

Schnapauff, J. 1966, Luftblasen in Rohrleitungen – vereinfachend betrachtet, Neue Deliwa Zeitschrift, August, 371-373.

Sellin, R.H.J. 1983, The large Roman water mill at Barbegal (France), History of Technology 8, 91-109.

Smith, N.A.F. 1976, Attitudes to Roman Engineering and the question of the Inverted Siphon, in: History of Technology, Vol. I, 45-71, London.

Stenton, E.C. and Coulton, J.J. 1986, Oinoanda: The Watersupply and Aqueduct, Anatolian Studies 36, 15-59.

Stern, P. 1983, Field Engineering, Intermediate Technology Publications, London.

Waele de, J. 1996, Een Romeins ingenieursproject – De tunnel van Nonius Datus, Hermeneus 68, 173-181.

Weber, G. 1898, Die Hochdruck-Wasserleitung von Loadikeia ad Lycum, Jdl 13, 1-13.

Weber, G. 1899, Die Wasserleitungen von Smyrna, Jdl 14, 4-24.

Literatuur algemeen antieke en historische watervoorziening:

Roman Aqueducts and Watersupply, A. Trevor Hodge 1992, London

Serie 'Geschichte der Wasserversorgung' (6 delen) uitgegeven door Philipp von Zabern, Mainz, 1982 – 2004.

Er zijn twee verenigingen die zich bezighouden met de geschiedenis van de watervoorziening, de Frontinus Gesellschaft e.V., die jaarlijks een publicatie in 'Schriftenreihe der Frontinus Gesellschaft' uitgeeft en de serie van von Zabern heeft verzorgd, en de Deutsche Wasserhistorische Gesellschaft e.V., die de 'Schriften der Deutsche Wasserhistorische Gesellschaft DWHG' uitgeeft. Sinds 1975 wordt om de 2-4 jaar een internationaal symposium gehouden onder de noemer "Cura Aquarum". In 1994 en 1998 werd het door de Universiteit van Nijmegen georganiseerd. De '12th International Conference on the History of Water management and Hydraulic engineering, Cura Aquarum in Ephesus' vindt plaats 2-10 oktober 2004 te Efese (bij Izmir, Turkije) onder leiding van Dr. Gilbert Wiplinger van het Oostenrijkse Archeologische Instituut (ÖAI).

Frontinus Gesellschaft e.V.

c/o DVGW e.V.

Josef-Wirmer Straße 1-3

D-53123 Bonn

Tel. 0049-228-91 88 666

Internet: www.frontinus.de

E-mail: info@frontinus.de

Deutsche Wasserhistorische Gesellschaft e.V.

(DWHG)

C/o WTV, Frau Marga Basche

Kronprinzenstraße. 13

D-53721 Siegburg

Tel. 0049-2241-128 102

Internet: www.dwhg-ev.de

E-mail: basche@wahnbach.de

Dank is verschuldigd aan Prof. J. Burdy (Lyon), Dr. K. Grewe (Bonn), Prof. H. Fahlbusch (Lübeck) en E. van Leeuwen (Nijmegen), voor het beschikbaar stellen van afbeeldingen. Erkentelijkheid gaat uit naar Prof. dr. ir. F. Clemens (TU Delft), voor het mogelijk maken van deze publicatie.



Uitgave

HoLaPress Communicatie B.V.
Postbus 130, 5550 AC Valkenswaard

Uitgave

HoLaPress Wetenschap BV
Postbus 130, 5550 AC Valkenswaard

Redactiesecretariaat en administratie

tel. 040 – 208 60 75
fax: 040 – 206 01 64
redactie@rioleringswetenschap.net

Redactie

ir. W.J.P. Worst (voorzitter)
prof. dr. ir. J.E. Berlamont
prof. dr. ir. F.H.L.R. Clemens
ir. J.M.U. Geerse
ing. M. Geise
ir. K. Michielsen
ir. M.R. Moens

Eindredactie

W.J. Schampers

Opmaak

C. Biessen

Druk:

Drukkerij Paesen, Opglabbeek

Abonnementen

Prijs per jaargang 108 euro
Abonnementen worden steeds aangegaan voor een aantal van vier nummers; zonder schriftelijke opzegging van twee maanden voor het begin van de nieuwe jaargang worden abonnementen stilzwijgend voor de periode van een jaar verlengd.

Publicatierecht

Op het copyright is steeds het Nederlandse recht van toepassing; artikelen of delen daaruit mogen dan ook niet zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van auteur c.q. redactie worden overgenomen, danwel in andere bladen worden gepubliceerd.

Toestemming voor publicatie van het artikel op internet werd verkregen van de auteur c.q. de redactie.

ISBN 1568-3788