

RAPPORT

Analyse kunstwerken Geul

Analyse kunstwerken Geul

Klant: Waterveiligheid en Ruimte Limburg

Referentie: BK3529-HAS-XX-ZZ-RP-Z-0001

Status: Definitief/0001

Datum: 16 september 2025

HASKONING NEDERLAND B.V.

Koggelaan 21
8017 JN Zwolle
Netherlands
Water & Maritime
Trade register number: 56515154

Telefoon: +31 88 348 65 00
E-mail: info@rhdhv.com
Website: haskoning.com

Titel document: Analyse kunstwerken Geul
Ondertitel: Analyse kunstwerken Geul
Referentie: BK3529-HAS-XX-ZZ-RP-Z-0001
Uw kenmerk: -
Status: Definitief/0001
Datum: 16 september 2025
Projectnaam: Analyse kunstwerken Geul
Projectnummer: BK3529
Auteur(s): Jolijn Hiemstra, Danny Heuvelink

Opgesteld door: Jolijn Hiemstra, Danny Heuvelink

Gecontroleerd door: Danny Heuvelink

Datum: 15 september 2025

Goedgekeurd door: Toine Kerckhoffs

Datum: 16 september 2025

Classificatie: Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. Haskoning Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van Haskoning Nederland B.V. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding en doel	1
1.2	Leeswijzer	1
2	Algemene uitgangspunten	2
2.1	Ruimtelijke afbakening	2
2.2	Instrumentaria	3
2.3	Gebruikte gegevens	3
3	Vaststellen nauwkeurigheid van schematiseren en parameteriseren van de kunstwerken	4
3.1	Analytische formules	5
3.1.1	Formules Sifons en Duikers	5
3.1.2	Formules bruggen	9
3.1.3	Formules Stuw	10
3.1.4	Formules Onderlaat	12
3.1.5	Formules Meetgoten	13
3.1.6	Analytische berekening Compound structures	14
3.2	Overzicht kunstwerken met analytische formules en parameters	14
3.3	Resultaten opstuwing kunstwerken	16
4	Gevoeligheidsanalyse parameters	19
4.1	Gevoeligheidsanalyse duikers	19
4.2	Gevoeligheidsanalyse Bruggen	21
4.3	Gevoeligheidsanalyse stuwen	23
4.4	Gevoeligheidsanalyse onderlaten	23
5	Advies verbeteren nauwkeurigheid schematisatie en parametrisatie kunstwerken	25
5.1	Formules D-HYDRO in vergelijking met analytische formules	25
5.2	Effect doorvoeren aanpassingen in model	28
5.3	Advies aanpassing kunstwerken	31
6	Opstuwing stedelijke kernen	34
6.1	Methodologie	34
6.2	Resultaten opstuwing per stedelijke kern	34
6.2.1	Bunde	35
6.2.2	Rothem	36
6.2.3	Meerssen	37
6.2.4	Houthem	38

6.2.5	Valkenburg	39
6.2.6	Schin op Geul	40
6.2.7	Gulpen	41
6.2.8	Partij	42
6.2.9	Wahlwiller	43
6.2.10	Nijswiller	44
6.2.11	Mechelen	45
6.2.12	Eys	46
6.2.13	Simpelveld	47

Bijlagen

A1	Outlet controlled formule Gelok
----	---------------------------------

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Na de extreme neerslag in de zomer van 2021 is het programma Waterveiligheid en Ruimte Limburg (WRL) opgestart. Voor het vergroten van de fysieke robuustheid van het watersysteem inventariseert WRL samen met haar partners en stakeholders potentiële maatregelen die geclassificeerd worden in de maatregelentypen 'Vasthouden, Bergen, Afvoeren, Beschermen'. Na de verkenning van maatregelen worden de maatregelenpakketten samengesteld die in een rekenmodel integraal op effectiviteit beoordeeld worden.

Haskoning voert een verkennend onderzoek uit naar de afvoercapaciteit van de kunstwerken in de waterlopen in het stroomgebied van de Geul. Dit onderzoek kent drie doelen:

1. Inzicht krijgen in opstuwing van kunstwerken en daarmee de afvoercapaciteit die eventueel negatief wordt beïnvloed;
2. Inzicht verkrijgen in de mate van opstuwing per stedelijke kern;
3. Inzicht krijgen in de manier van modelleren van kunstwerken.

1.2 Leeswijzer

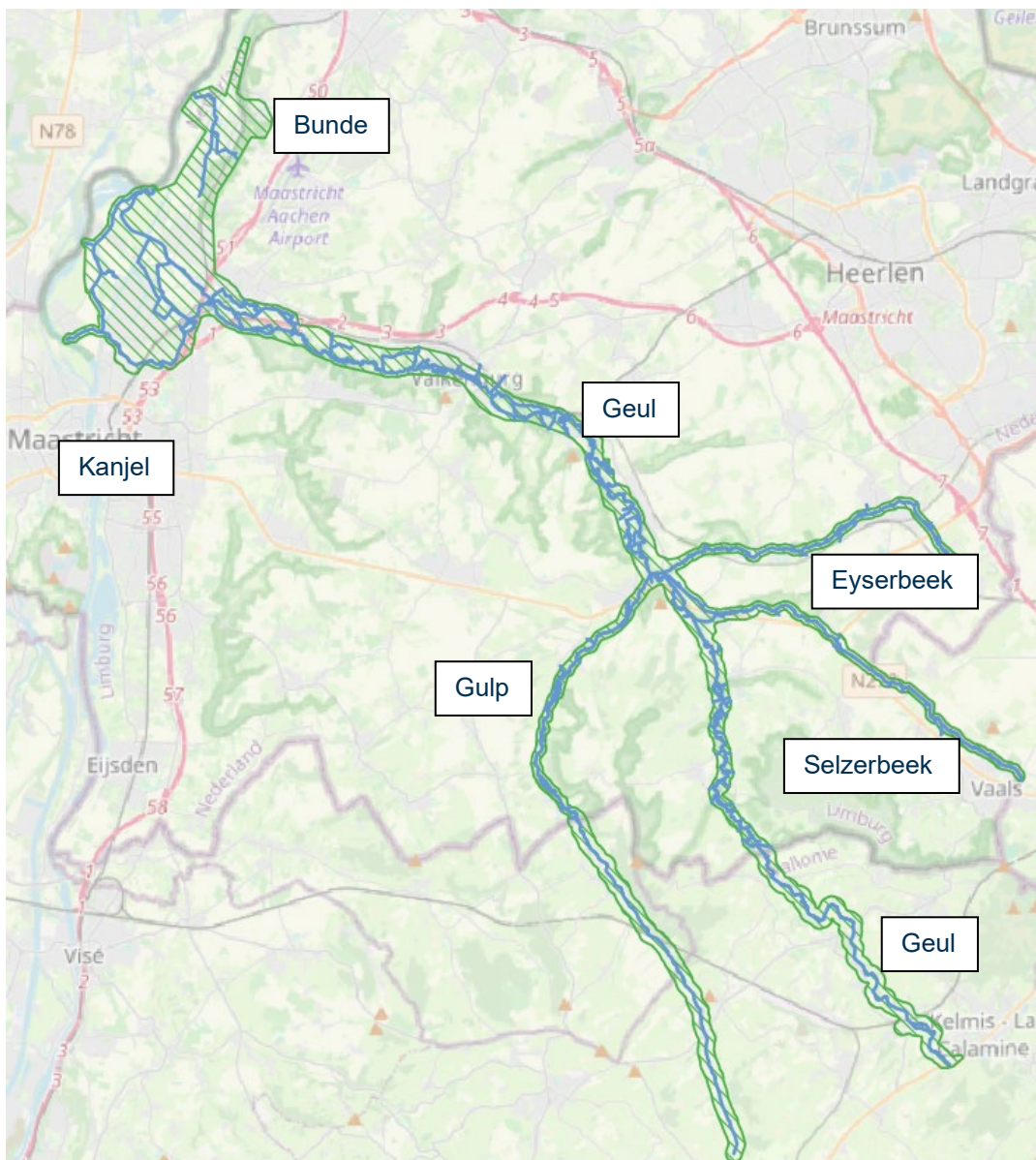
In hoofdstuk 2 worden de algemene uitgangspunten beschreven die nodig zijn om de hydraulische analyse van de kunstwerken uit te voeren. Dit omvat onder andere de ruimtelijke afbakening (2.1), de te gebruiken modelinstrumentaria (2.2) en de gebruikte gegevens (2.3). Aansluitend volgt in hoofdstuk 3 een toelichting op de toetsing van het model aan de analytische formules en een gevoeligheidsanalyse op de analytische parameters. Hoofdstuk 4 bevat een advies voor het verbeteren van de schematisatie van het model. In hoofdstuk 5 wordt de opstuwing per stedelijke kern uiteengezet.

2 Algemene uitgangspunten

In dit hoofdstuk zijn de uitgangspunten beschreven waarmee de analyse is ingezet. Hierbij gaat het om de ruimtelijke afbakening, modellen en gegevens die voor deze analyse gebruikt zijn.

2.1 Ruimtelijke afbakening

Het modelgebied van de Geul is zichtbaar in figuur 2-1, met de 1D-waterlijnen en het bereik van het 2D-grid in groen gearceerd. Deze afbakening is gebaseerd op de hoofdwaterlopen en inundatiegebieden. De Geul ontspringt in het noordoostelijke deel van de Belgische Ardennen en stroomt via Epen, Gulpen en Valkenburg bij Bunde uit in de Maas. Ter hoogte van Gulpen voegen de Gulp, Selzerbeek en Eyserbeek zich bij de Geul. In het modelgebied wordt het gebied Bunde/Brommelen/Geulle inclusief de Rijnbeek en Verlegde en Oude Broekgraaf toegevoegd. Deze gebieden kunnen namelijk overstromen vanuit de Geul. De toetsing van het watersysteem vindt alleen plaats voor het Nederlandse deel van het stroomgebied.



Figuur 2-1: Modelgebied en waterlopen.

2.2 Instrumentaria

De modellering vond plaats in D-HYDRO Suite 1D2D. Voor de watersysteemtoetsing Geul (RHDHV, 2025) werd gebruikgemaakt van de D-HYDRO Suite versie die destijds beschikbaar was. Dit model bevatte enkele belangrijke aanpassingen ten opzichte van het in 2023 opgebouwde model. Deze keuze werd voorafgaand aan het project vastgelegd. De versie D-HYDRO 2025.01 diende als basis en werd tevens gebruikt voor de toetsing.

2.3 Gebruikte gegevens

De gebruikte gegevens zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2.1: Overzicht gebruikte gegevens.

Bestand	Bron
Meetreeksen	FEWS
Te analyseren kunstwerken	WRL
D-HYDRO model de Geul	Waterschap Limburg & RHDHV (model watersysteemtoetsing)
Afvoersituaties HBV knopen	Waterschap Limburg
Achtergrondinformatie	Zie paragraaf 3.2
BI6792-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0005-Analyse en maatregelen wateroverlast_incl bijlagen.pdf	Haskoning & Deltares

D-HYDRO afvoergolf

Voor berekeningen met het D-HYDRO model is de afvoergolf Q140 gebruikt. Q140 is de stationaire afvoer met de herhalingstijd van eens per 10 jaar. Onderstaande tabel geeft een overzicht van het debiet van Q140 van de zijtakken bij aantakking op de Geul en van de Geul zelf.

Tabel 2.2: Overzicht afvoer van Geul en zij-beken in D-HYDRO voor afvoergolf Q140.

Watergang	Afvoer [m³/s]
Selzerbeek	2,15
Eyserbeek	3,63
Gulp	4,98
Geul – bovenstrooms (voor aantakking zijbeken)	32,17
Geul – benedenstrooms (Benedenstroomse punt in D-HYDRO)	50,86

3 Vaststellen nauwkeurigheid van schematiseren en parameteriseren van de kunstwerken

In dit hoofdstuk wordt de opstuwung per kunstwerk analytisch berekend en vergeleken met de resultaten uit het model. In het geval van een compound structure is de afvoer per kunstwerk vastgesteld en vergeleken met de uitkomsten van het model. Voor meetgoten werd de bovenstroomse waterhoogte berekend en getoetst aan de modelresultaten. Daarnaast is per kunstwerk de stroomsnelheid berekend en vergeleken met het model. De gebruikte analytische formules zijn hieronder beschreven, gevolgd door een overzicht van de resultaten. Tabel 3-1 toont de door het waterschap aangeleverde kunstwerken voor de analytische controle.

Tabel 3.1: Overzicht te analyseren kunstwerken.

Kunstwerk ID	Type kunstwerk	Kunstwerk ID	Type kunstwerk
D_13697 & D_13697_2 & D_13697_3 & D_13697_4 & D_13697_5	Compound met 5 sifons	S_99336	Compound met brug, zij-overlaat en nevengeul
D_12875 & D_15520	Compound met 2 duikers	B_11809	Duiker
B_10890	Brug	M_42882 + B_10348	Meetgoot (brug erboven)
B_11086	Brug	M_43488	Meetgoot
S_96111	Onderlaat (orifice)	B_10384	Brug/meetgoot
B_10575	Brug	S_96338_4 & S_96338_1 & S_96338_2 & S_96338_3	Compound met 1 stuw en 3 onderlaten
B_10893	Duiker (Begint als boog, eindigt rechthoekig)	M_43047	Meetgoot
B_10888	Brug (Dubbele boogbrug)	B_11284 & S_O_11284	Brug met open railing (brug + stuw)
D_14366	Duiker	B_10213	Brug
D_16414	Duiker	S_172593	Compound met zij-overlaat

3.1 Analytische formules

De analytische formules voor deze studie zijn gebaseerd op literatuuronderzoek. Hiervoor zijn de volgende bronnen geraadpleegd:

- Ven Te Chow, 1959, Open-Channel Hydraulics;
- Cultuur Technisch Vademecum, 1988;
- Richtlijnen voor het berekenen van afwateringsstelsels in landelijke gebieden, Gelok, 1969;
- Irrigation and Drainage, 2001, Measuring- and Regulating structures
- Handboek debietmeten in open waterlopen, Stowa, 2009, pagina 146 – 147

Onderstaande paragrafen beschrijven de analytische formules per kunstwerktype. De gehanteerde formules zijn samengevat in Tabel 3-2.

Tabel 3.2: Analytische formules per kunstwerk.

Type kunstwerk	Formule
Sifon	Gelok
Duiker	Gelok
Brug (met pijlers)	Uwe Reh (Gelok)
Brug (vrij overspanning)	Gelok
Brug (boogbrug)	Gelok
Onderdoorlaat (orifice)	Stuwformule
Overlaat (weir)	Stuwformule
Meetgoot	Meetgoten formule van Stowa
Samengestelde kunstwerken (compound structures)	Combinatie

3.1.1 Formules Sifons en Duikers

Voor sifons en duikers zijn de onderstaande formule van Gelok gebruikt:

$$Q = \mu \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \quad \text{Vergelijking 3-1}$$

$$z = \frac{Q^2}{(\mu \cdot A)^2 \cdot 2 \cdot g} \quad \text{Vergelijking 3-2}$$

$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \quad \text{Vergelijking 3-3}$$

Waar,

$Q \text{ [m}^3\text{/s]}$ = debiet

$z \text{ [m]}$ = opstuwing

$v \text{ [m/s]}$ = stroomsnelheid

$\mu \text{ [-]}$ = weerstandscoefficiënt

$g \text{ [m/s}^2\text{]}$ = valversnelling

$A \text{ [m}^2\text{]}$ = bovenstroomse natte oppervlak

Waardes uit D-HYDRO

In geval van rechthoekige duiker is: $A = b \cdot h_1$, waarbij de bovenstroomse waterdiepte uit D-HYDRO wordt gebruikt. In geval van een duiker met een boog wordt de natte oppervlakte berekend met de profielen uit D-HYDRO en de bovenstroomse waterstand van D-HYDRO.

Voor de berekening van de opstuwing van een duiker (Vergelijking 3-2), gebruiken we de afvoer (Q) uit D-HYDRO. Voor de berekening van de afvoer en de stroomsnelheid door de duiker (Vergelijking 3-1 en Vergelijking 3-3), gebruiken we de opstuwing (z) uit D-HYDRO.

Weerstandscoefficiënt

Voor de weerstandscoefficiënt μ geldt de volgende formule:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{in} + \epsilon_{wrijving} + \epsilon_{uit} + \epsilon_{bocht}}} \quad \text{Vergelijking 3-4}$$

Waar,

ϵ_{in} [-] = intreeweerstand coëfficiënt

$\epsilon_{wrijving}$ [-] = wrijvingsverlies coëfficiënt

ϵ_{uit} [-] = uittreeverlies coëfficiënt

ϵ_{bocht} [-] = bocht- en knikverliezen coëfficiënt

Intreeweerstand coëfficiënt

De intreeweerstand coëfficiënt is afhankelijk van de vormen van instroomopeningen, zie onderstaande tabellen Tabel 3-3 en Tabel 3-4 voor de parameter waardes (waardes in Cultuur Technisch Vademecum, 1988, pagina 808 en van Hydraulic Design of highway culverts, Federal Highway Administration, 2012).

Tabel 3.3: Intreeweerstand coëfficiënten voor betonnen rechthoekige duikers.

Type	Configuratie	ϵ_{in}
Kopmuur parallel aan talud (geen vleugelwanden)	Rechte randen op 3 zijden	0,5
	Afgeronde randen op 3 zijden tot een radius 1/12 van duiker	0,2
Vleugelwanden bij 30° tot 75° ten opzichte van duiker	Rechte rand bij bovenkant duiker	0,4
	Bovenkant duiker afgerond	0,2
Vleugelwand bij 10° tot 25° ten opzichte van de duiker	Rechte rand bovenkant duiker	0,5
Vleugelwanden parallel (verlenging van zijden)	Rechte rand bovenkant duiker	0,7
	Zij- of helling afgeschuinde inlaat	0,2

Tabel 3.4: Intreeweerstand coëfficiënten voor betonbogen.

Configuratie	ϵ_{in}
Vleugelwanden 0°	0,5
Vleugelwanden 45°	0,3
Rechte kopmuur	0,4

Wrijvingsverlies coëfficiënt

Het wrijvingsverlies coëfficiënt wordt berekend met onderstaande formule.

$$\varepsilon_{wrijving} = \frac{2 \cdot g \cdot L}{(k_M \cdot R^6)^2 \cdot R} \quad \text{Vergelijking 3-5}$$

Waar,

L [m] = lengte duiker

g [m/s²] = valversnelling

K_M [m^{1/3}/s] = Manning wandruweheidsfactor, bepalen met Tabel 3-5 en Tabel 3-6 (Ven te Chow, 1959)

R [m] = hydraulische straal van de duiker

Tabel 3.5: Manning wandruweheidsfactor voor betonnen duikers (Ven te Chow, 1959).

k_M-waarden in m^{1/3} · s⁻¹ voor beton	Minimum	Normaal	Maximum
1. duiker, recht en schoon	75	90	100
2. duiker met bochten, verbindingen en enige verontreiniging	70	75	90
3. afgewerkt	70	85	90
4. rioolbuis met mangaten, inlaten e.d. recht	55	65	75
5. niet afgewerkt, bij stalen bekisting	70	75	85
6. niet afgewerkt, bij gladde houten bekisting	60	70	85
7. niet afgewerkt, bij ruwe houten bekisting	50	60	65

Tabel 3.6: Manning wandruweheidsfactor voor gegolfde plaatstalen duikers (Ven te Chow, 1959).

Kleine meerplatige duikers		Grote meerplatige duikers	
golfafmetingen in mm l × h	toe te passen k _M -waarden in m ^{1/3} · s ⁻¹	golfafmetingen in mm l × h	toe te passen k _M -waarden in m ^{1/3} · s ⁻¹
67 × 13	40	150 × 50	30
100 × 20	38	152 × 51	30
125 × 32	35	200 × 55	30

Waardes uit D-HYDRO

Voor de berekening van de hydraulische straal met R=A/P, is de bovenstroomse waterdiepte uit D-HYDRO gebruikt om het natte oppervlak en de natte omtrek te bepalen.

Uittreeverlies coëfficiënt

Het uittreeverlies coëfficiënt wordt berekend met onderstaande formule

$$\varepsilon_{uit} = \left(1 - a \cdot \frac{A}{A_{kanaal}}\right)^2 \cdot k \quad \text{Vergelijking 3-6}$$

Waar,

A [m²] = benedenstroomse natte oppervlak van de duiker

k [-] = coëfficiënt afhankelijk van de vorm van uitstroomopening van duiker, gelijkgesteld aan 1

a [-] = het aantal naast elkaar gelegen duikers

A_{kanaal} [m²] = natte oppervlak benedenstroomse waterloop

De waarde van k bepaalt hoeveel kinetische energie er verloren gaat bij de uitstroom van de duiker. Een hogere waarde van k betekent meer energieverlies, terwijl een lagere waarde van k minder energieverlies impliceert. Wanneer de uitgang van een duiker zo groot is dat de snelheid van het water daar bijna nul is, wordt de kinetische energie van het water aan het begin van de duiker omgezet in een andere vorm van energie wanneer het water vertraagt, dit is het geval als k gelijk is aan 1. Als k nul benadert, gaat er nauwelijks kinetische energie verloren en is de uitstroomopening zo ontworpen dat de stroming van water nauwelijks extra energieverlies veroorzaakt.

Meestal wordt er in modellering een waarde van 1 aangenomen. Bij een aanname van $k = 1$ wordt de uitstroomweerstand overschat. In werkelijkheid varieert deze waarde globaal tussen 0,3 en 1,0. De waarde van k kan verlaagd worden als de overgang tussen duiker en watergang minder abrupt is. Wanneer de duiker uitstroomt in een meer of groot reservoir, moet de waarde van k op 1 gesteld worden. Een literatuuronderzoek naar deze waarden, geeft inzicht in de gehanteerde aannames. Een gevoeligheidsanalyse van de formule is uitgevoerd om de impact van k te bepalen.

Waardes uit D-HYDRO

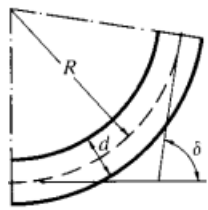
Het natte oppervlak van de waterlopen is berekend met de afvoer en stroomsnelheid van de benedenstroomse watergang, deze waardes komen uit D-HYDRO.

Bij het berekenen van de uittreweerstand is de benedenstroomse natte oppervlakte gebruikt. In geval van rechthoekige duiker is: $A = b \cdot h_2$, waarbij de benedenstroomse waterdiepte uit D-HYDRO is gebruikt. In geval van een duiker met een boog is de natte oppervlakte berekend met de profielen uit D-HYDRO en de benedenstroomse waterstand van D-HYDRO.

Bocht- en knikverliezen coëfficiënt

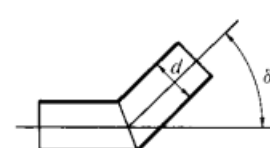
Bij het bepalen van de bocht- en knikverliezen coëfficiënt is uitgegaan van onderstaande Tabel 3-7 en Tabel 3-8. Aangenomen is dat een hoek verwaarloosbaar is wanneer die kleiner is dan 20° (Al-Juboori & Al-Murshidi, 2021).

Tabel 3.7: Bochtverlies coëfficiënt van duikers (Huisman, 1969).



	Ruw					Glad
$\delta =$	15°	$22,5^\circ$	45°	60°	90°	90°
$R = d$	0,03	0,045	0,14	0,19	0,21	0,51
$= 2d$	0,03	0,045	0,09	0,12	0,14	0,30
$= 4d \quad \xi_b =$	0,03	0,045	0,08	0,10	0,11	0,23
$= 6d$	0,03	0,045	0,075	0,09	0,11	0,20
$= 10d$	0,03	0,045	0,07	0,07	0,09	0,18

Tabel 3.8: Knikverlies coëfficiënt van duikers en sifons (Huisman, 1969).



$\delta =$	5°	10°	15°	$22,5^\circ$	30°	45°	60°	90°
glad $\xi_k =$	0,02	0,03	0,04	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13
ruw $\xi_k =$	0,02	0,04	0,06	0,11	0,17	0,32	0,68	1,27

Bij het gebruik van de formule van Gelok is de meest beperkende ingang of uitgang voor de dimensies van de duiker gebruikt. Voor deze berekening is ervan uitgegaan dat de duiker een constante vorm heeft die gelijk is aan deze ingang of uitgang.

De formule gaat uit van 'outlet controlled' condities, waarbij de waterstroming door de duiker wordt beperkt door de benedenstroomse condities of de capaciteit van de duiker. In het geval van een ondergedompelde ingang gelden specifieke criteria om te bepalen of er sprake is van outlet control. Dit betekent dat de waterdiepte direct aan de ingang en direct aan de uitgang van de duiker groter moet zijn dan de hoogte van de duiker. Met andere woorden, de duiker moet volledig ondergedompeld zijn.

Voor een duiker met vrije waterstroming bij de ingang is er sprake van outlet control als de bodemhelling van de duiker kleiner is dan de kritieke helling; een milde helling. De kritieke helling is de bodemhelling van de duiker die kritieke stromingscondities veroorzaakt. Er is een controle uitgevoerd om te bepalen of de duiker outlet controlled is door het stromingsregime door de duiker te bepalen. Zie Bijlage A1 voor de berekening, voor deze berekeningen zijn waarden uit D-HYDRO gebruikt. Alle duikers hebben een outlet controlled stromingsregime, een inlet controlled stromingsregime komt niet voor in de berekeningen.

3.1.2 Formules bruggen

Pilaar bruggen

Voor bruggen met pilaren is de formule van Uwe Reh gebruikt:

$$z = \zeta \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{h_v}{t}\right) \cdot h_v \quad \text{Vergelijking 3-7}$$

$$\zeta = (\delta_0 - \alpha(\delta_0 - 1))(0,4 \cdot \alpha + \alpha^2 + 9 \cdot \alpha^4) \quad \text{Vergelijking 3-8}$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Vergelijking 3-9}$$

Waar,

ζ [-] = parameter afhankelijk van de vorm van de pilaren en de ratio van de oppervlakte van de pilaren tegenover de natte oppervlakte van de pilaren

δ_0 [-] = parameter afhankelijk van de vorm van de pilaren

h_v [m] = stroomsnelheid hoogte zonder pilaren: $h_v = \frac{v_0^2}{2 \cdot g}$

t [m] = gemiddelde waterhoogte of waterstroming zonder pilaren

α [-] = ratio van obstructie van natte oppervlakte (= oppervlakte van pilaar/natte oppervlakte zonder pilaren)

A [m²] = natte oppervlakte van de brug

Waarden uit D-HYDRO

De natte oppervlakte van de brug is berekend aan de hand van de profielen uit D-HYDRO. Vervolgens is de natte oppervlakte van de pilaar ($b \cdot h_1$) van de totale natte oppervlakte afgetrokken, aangezien de pilaar niet wordt meegenomen in D-HYDRO. De stroomsnelheid hoogte zonder pilaren (h_v) is berekend met de stroomsnelheid uit D-HYDRO. De gemiddelde waterhoogte zonder pilaren (t) is gelijkgesteld aan de bovenstroomse waterdiepte uit D-HYDRO.

De stroomsnelheid van bruggen met pilaren is berekend met het debiet uit D-HYDRO en de natte bovenstroomse oppervlakte berekend met de waterdiepte uit de formule van Uwe Reh.

Boogbruggen en bruggen met vrije overspanning

Voor bruggen zonder pilaren geldt de formule van Gelok. Voor een boogbrug en brug met vrije overspanning geldt de volgende formule voor weerstandscoefficiënt:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{in} + \varepsilon_{wrijving} + \varepsilon_{uit}}} \quad \text{Vergelijking 3-10}$$

Waar,

$\varepsilon_{in} [-]$ = intreeweerstand coëfficiënt

$\varepsilon_{wrijving} [-]$ = wrijvingsverlies coëfficiënt

$\varepsilon_{uit} [-]$ = uittreeverlies coëfficiënt

Voor het gebruik van de Gelok formule voor bruggen gelden dezelfde aannames die hierboven voor duikers zijn vermeld.

Waardes uit D-HYDRO

Bij de berekening van de natte oppervlakte van boogbruggen zijn de profielen uit D-HYDRO aangenomen, bij deze berekening is ook de bovenstroomse waterdiepte uit D-HYDRO toegepast. Voor het uittreeverlies is de benedenstroomse waterdiepte uit D-HYDRO toegepast om het natte oppervlak te bepalen.

Weerstandscoefficiënt

Voor bruggen geldt in dat in D-HYDRO de weerstandscoefficiënt (μ) gemaximaliseerd is op 1. Voor de bruggen wordt een check uitgevoerd op de weerstandscoefficiënt. Voor bruggen met een vrije overspanning en boogbruggen wordt de weerstandscoefficiënt al berekend, voor bruggen met pilaren is de volgende formule gebruikt om de discharge coëfficiënt te bepalen:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\delta_0 \cdot \alpha}} \quad \text{Vergelijking 3-11}$$

Wanneer uit de berekening blijkt dat de weerstandscoefficiënt boven de 1 uitkomt wordt de opstuwing niet goed berekend in D-HYDRO.

3.1.3 Formules Stuw

Voor stuwen is gebruik gemaakt van twee formules, afhankelijk of de overlaat volkomen of onvolkomen is. De volgende formules gelden voor volkomen overlaat:

$$Q = 1.7 \cdot m \cdot b \cdot h_1^{\frac{3}{2}} \quad \text{Vergelijking 3-12}$$

$$z = \left(\frac{Q}{1.7 \cdot m \cdot b} \right)^{\frac{2}{3}} - h_2 \quad \text{Vergelijking 3-13}$$

$$v = m \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g} \cdot \sqrt{h_1} \quad \text{Vergelijking 3-14}$$

Voor een onvolkomen overlaat gelden de volgende formules:

$$Q = m \cdot b \cdot h_2 \cdot \sqrt{z \cdot 2 \cdot g} \quad \text{Vergelijking 3-15}$$

$$z = \left(\frac{Q}{m \cdot b \cdot h_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \quad \text{Vergelijking 3-16}$$

$$v = m \cdot \sqrt{z \cdot 2 \cdot g} \quad \text{Vergelijking 3-17}$$

Waar,

$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$ = debiet

$z \text{ [m]}$ = opstuwing t.o.v. stuwkruinhoogte

$v \text{ [m/s]}$ = stroomsnelheid

$m \text{ [-]}$ = afvoercoëfficiënt afhankelijk van de vorm van het stuwlichaam, zie Tabel 3-9.

$b \text{ [m]}$ = breedte van de stuw

$z_s \text{ [m]}$ = stuwkruinhoogte

$h_2 \text{ [m]}$ = benedenstroomse waterstand

$h_1 \text{ [m]}$ = bovenstroomse waterstand

De formule van onvolkomen overlaat is van toepassing als: $h_2 > z_s$

De formule van een volkomen overlaat is van toepassing als: $h_2 \leq z_s$

Tabel 3.9: M-waardes voor kruinvormen bij rechthoekige stuwen (Cultuur Technisch Vademecum, 1988).

	Kruinvorm	m-waarde
	Breed, scherp, loodrechte wanden	0,85-0,88
	Breed, afgeronde hoeken, loodrechte wanden	0,87-0,95
	Breed, geheel afgerond, gestreken klep	1,13-1,27
	Scherp, goede beluchting	1,11
	Afgerond, loodrechte bovenstroomse wand en schuine benedenstroomse wand	1,30
	Dakvormig, afgerond	1,37

Waardes uit D-HYDRO

Voor de berekening van de opstuwing van stuwen (Vergelijking 3-13 en Vergelijking 3-16) gebruiken wij de afvoer (Q) en benedenstroomse waterstand (h_2) uit D-HYDRO. Voor de berekening van de opstuwing en stroomsnelheden van volkomen overlaten (Vergelijking 3-12 en Vergelijking 3-14) gebruiken wij de bovenstroomse waterstand (h_1) uit D-HYDRO. Voor de berekening van de opstuwing en stroomsnelheden van onvolkomen overlaten (Vergelijking 3-15 en Vergelijking 3-17) gebruiken wij de opstuwing (z) uit D-HYDRO.

3.1.4 Formules Onderlaat

Voor volkomen onderlaat:

$$Q = c_e \cdot b \cdot h_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \text{Vergelijking 3-18}$$

$$z = \left(\frac{Q}{c_e \cdot b \cdot h_g} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \quad \text{Vergelijking 3-19}$$

$$v = c_e \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \text{Vergelijking 3-20}$$

Voor onvolkomen onderlaat:

$$Q = C_d \cdot b \cdot h_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad \text{Vergelijking 3-21}$$

$$z = \left(\frac{Q}{C_d \cdot b \cdot h_g} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g} - h_2 \quad \text{Vergelijking 3-22}$$

$$v = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad \text{Vergelijking 3-23}$$

Waar,

$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$ = debiet

$z \text{ [m]}$ = opstuwing t.o.v. stuwkruinhoogte

$v \text{ [m/s]}$ = stroomsnelheid

$h_g \text{ [m]}$ = hoogte van onderlaat opening

$b \text{ [m]}$ = breedte van onderlaat opening

$C_d \text{ [-]}$ = correctie coëfficiënt onderlaat, afhankelijk van Froude getal en h_2/h_g (H.R. Henry)

$C_e \text{ [-]}$ = effectieve debiet coëfficiënt, afhankelijk van hoogte opening onderlaat en energiehogte bovenstrooms, gelijkgesteld aan 0,64.

$h_1 \text{ [m]}$ = waterhoogte bovenstrooms van onderlaat

$h_2 \text{ [m]}$ = waterhoogte benedenstrooms van onderlaat

$z_s \text{ [m]}$ = hoogte van onderlaat opening

De formule van onvolkomen onderlaat is van toepassing als: $h_2 > h_g$

De formule van een volkomen onderlaat is van toepassing als: $h_2 \leq h_g$

In het geval van $h_1 < h_g$ wordt gebruik gemaakt van de stuwformules.

Waardes uit D-HYDRO

Voor de berekening van de opstuwing van een onderlaat (Vergelijking 3-19 en Vergelijking 3-22) gebruiken we de afvoer (Q) uit D-HYDRO. Voor de berekening van de afvoer en stroomsnelheid door een onderlaat (Vergelijking 3-18, Vergelijking 3-20, Vergelijking 3-21 en Vergelijking 3-23) gebruiken we bovenstroomse en benedenstroomse waterhoogtes (h_1 en h_2) uit D-HYDRO.

3.1.5 Formules Meetgoten

Voor de berekening van de opstuwings van meetgoten is gebruik gemaakt van de afvoerrelatie voor een trapeziumvormige meetgoot (Stowa, 2009). Met de volgende formule is de overstorthoogte berekend (h_1).

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot g^{0.5} \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_S \cdot C_{dr} \cdot b \cdot h_1^{\frac{3}{2}} \quad \text{Vergelijking 3-24}$$

$$v = Q/A \quad \text{Vergelijking 3-25}$$

Waar,

Q [m^3/s]	= debiet
v [m/s]	= stroomsnelheid
g [m/s^2]	= versnelling van zwaartekracht
C_D [-]	= afvoer coëfficiënt
C_V [-]	= coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid
C_S [-]	= vormcoëfficiënt
C_{dr} [-]	= reductiefactor voor gestuwde afvoer, bij ongestuwde afvoer $C_{dr} = 1$
b [m]	= breedte van de kruin
h_1 [m]	= overstorthoogte

$$C_V = \left(\frac{H_1}{h_1}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Vergelijking 3-26}$$

$$C_D = \left(1 - \left(0,006 \cdot \frac{L}{b}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(0,003 \cdot \frac{L}{h_1}\right)\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Vergelijking 3-27}$$

Waar,

H_1 [m]	= bovenstroomse energiehogte ($= h_1 + v^2/2g$)
L [m]	= lengte van de keel

De stroomsnelheid wordt berekend met $v = Q/A$. De overstorthoogte is berekend door middel van iteratie. De waterhoogte voor de meetgoot is gelijk aan de overstorthoogte opgeteld met de bodemverhoging van de meetgoot ten opzichte van de bovenstroomse bedding. Deze waterhoogte is vergeleken met de waterhoogtes berekend door D-HYDRO.

$$A = (B + m \cdot h_1) \cdot h_1 \quad \text{Vergelijking 3-28}$$

$$R = \frac{A}{B + 2 \cdot h_1 \cdot \sqrt{1 + m^2}} \quad \text{Vergelijking 3-29}$$

Waar,

B [m]	= breedte van waterloop
m [m/m]	= wandhelling van waterloop
h_1 [m]	= overstorthoogte

Waardes uit D-HYDRO

Voor de berekening van de overstorthoogte en de stroomsnelheid van de meetgoot gebruiken we het debiet (Q) uit D-HYDRO. Bij de berekening van het natte oppervlak gebruiken wij de bovenstroomse waterhoogte (h_1) uit D-HYDRO.

3.1.6 Analytische berekening Compound structures

Bij compound structures waar meerdere kunstwerken naast elkaar staan met dezelfde afmetingen is dezelfde formules als voor de individuele kunstwerken zoals hierboven besproken gebruikt. Hierbij is de opstuwings voor het totale kunstwerk berekend op basis van de afvoer (waarden uit D-HYDRO) dat door het kunstwerk stroomt. De afmetingen van de afzonderlijke kunstwerken is bij elkaar opgeteld om de totale oppervlakte te bepalen waardoor het water stroomt. Bij het bepalen van de uitstroom weerstand is de oppervlakte waaruit het water stroomt gebruikt, dit is de opgetelde afmetingen van de kunstwerken naast elkaar.

In deze analyse zijn geen compound structures meegenomen waarbij er meerdere kunstwerken achter elkaar liggen.

Wanneer er verschillende kunstwerken naast elkaar liggen, is de berekende waterstand bovenstrooms en benedenstrooms in D-HYDRO (afvoersituatie: Q140) als input gebruikt. Vervolgens werd met deze waterstand per kunstwerk het resulterende debiet uitgerekend. De afvoeren van de kunstwerken werden bij elkaar opgeteld en de afwijking met de afvoer uit D-HYDRO werd gecontroleerd.

Voor de compound structures met zij-overlaat met daarna nevengeul, is de stuwformule (zie paragraaf 3.1.3) toegepast om de afvoer over het zij-overlaat te berekenen, deze is vergeleken met de afvoer uit D-Hydro. Kunstwerken die zich na de zij-overlaat bevinden (voor S_172593 een duiker en voor S_99336 een brug) zijn niet meegenomen in de berekening, omdat deze kunstwerken niet aanwezig zijn in het D-HYDRO model.

In het afvoerscenario van Q140 is er geen situatie waar het water een hoogte bereikt die boven de railing van de brug komt.

3.2 Overzicht kunstwerken met analytische formules en parameters

De gebruikte formules en parameters zijn weergegeven in Tabel 3-10. Voor de parameterwaarden van wandruwheid zijn dezelfde waarden als in D-HYDRO gebruikt.

Tabel 3.10: Overzicht kunstwerken en toepasbare formule.

Kunstwerk ID	Type kunstwerk	Formule	Parameters
D_13697 & D_13697_2 & D_13697_3 & D_13697_4 & D_13697_5	Compound met 5 sifons met dezelfde afmetingen	Formule van Gelok $z = \frac{Q^2}{\mu^2 \cdot (a \cdot A_{duiker})^2 \cdot 2g}$ $\epsilon_{uit} = (1 - a \cdot \frac{A_{duiker}}{A_{kanaal}})^2 \cdot k$ $\epsilon_{wrijving} = \frac{2 \cdot g \cdot L}{C^2 \cdot R}$	$K_M [m^{1/3}/s] = 60$ $C = K_M \cdot R^{1/6}$ $\epsilon_{in} [-] = 0,7$ $a [-] = 5$ (aantal kokers naast elkaar) $\epsilon_{bocht} [-] = 0$ (hoek is verwaarloosbaar <20° (Al-Juboori & Al-Murshidi (2021)) $A_{duiker} [m^2] = \text{nat oppervlak van 1 koker}$ $Q [m^3/s] = \text{totale debiet door sifon}$
D_12875 & D_15520	Compound met 2 duikers	Q vergelijking Gelok formule	$K_M [m^{1/3}/s] = 60$ $\epsilon_{in} [-] = 0,7$ $a [-] = 2$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
B_10890	Brug	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$

Kunstwerk ID	Type kunstwerk	Formule	Parameters
			$\epsilon_{in} [-] = 0,3$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
B_11086	Brug	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,4$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
S_96111	Onderlaat (orifice)	Formule voor onderlaat	-
B_10575	Brug	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,4$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
B_10893	Duiker (Begint als boog, eindigt rechthoekig)	Formule van Gelok (betonboog duiker)	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,4$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
B_10888	Brug (Dubbele boogbrug)	Formule van Uwe Reh	$\delta_0 [-] = 3,9$
D_14366	Duiker	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 60$ $\epsilon_{in} [-] = 0,3$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
D_16414	Duiker	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 60$ $\epsilon_{in} [-] = 0,7$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
S_99336	Compound met brug, zij-overlaat en nevengeul	Stuwformule	$m [-] = 0,86$
B_11809	Duiker	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,3$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
M_42882 + B_10348	Meetgoot (brug erboven)	Formule van Manning (waterhoogte bereikt brug niet in situatie van Q140)	$K_M [m^{1/3}/s] = 33$
M_43488	Meetgoot	afvoerrelatie voor een trapeziumvormige meetgoot	-

Kunstwerk ID	Type kunstwerk	Formule	Parameters
B_10384	Brug	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,4$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
S_96338_4 & S_96338_1 & S_96338_2 & S_96338_3	Compound met 1 stuw en 3 onderlaten	Berekening Q met 3x onderlaat formule (waterhoogte bereikt stuw niet in situatie van Q140)	-
M_43047	Meetgoot	afvoerrelatie voor een trapeziumvormige meetgoot	-
B_11284 & S_O_11284	Brug met open railing (brug + stuw)	Combinatie van formule van Gelok en stuwformule.	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,5$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$ $m [-] = 0,86$
B_10213	Brug	Formule van Gelok	$K_M [m^{1/3}/s] = 25$ $\epsilon_{in} [-] = 0,4$ $a [-] = 1$ $\epsilon_{bocht} [-] = 0$
S_172593	Zij-overlaat	Stuwformule	$m = 0,86$

3.3 Resultaten opstuwing kunstwerken

De Q140 is gebruikt om de gemodelleerde opstuwing te toetsen aan de analytisch berekende opstuwing. De berekende opstuwing is weergegeven in Tabel 3-11. Hierin is per kunstwerk de bovenstrooms afvoer, de berekende opstuwing in het model en analytisch en de stroomsnelheid voor zowel analytisch als model weergegeven. De resultaten voor compound structures zijn weergegeven in Tabel 3-12, hierin is de berekende afvoer in het model en analytisch en de stroomsnelheid voor zowel analytisch als model beschreven. Tabel 3-13 toont de resultaten van de waterhoogtes en de stroomsnelheden van meetgoten.

Opgemerkt wordt dat de opstuwing die analytisch is berekend niet altijd overeenkomt met de opstuwing die in het model is berekend. In hoofdstuk 4 wordt een nadere beschouwing van deze verschillen en de oorzaken van deze verschillen gegeven

Tabel 3.11: Vergelijking gemodelleerde opstuwing en stroomsnelheid en analytisch berekende opstuwing en stroomsnelheid kunstwerken.

Kunstwerk ID	Q bovenstrooms model [m ³ /s]	Opstuwing model [m]	Opstuwing analytisch [m]	Verschil opstuwing [m]	Stroomsnelheid model [m/s]	Stroomsnelheid analytisch [m/s]	Verschil stroomsnelheid [m/s]
D_13697*	10,18	0,39	0,20	-0,19	1,63	2,30	0,67
D_14366	3,16	0,30	0,23	-0,07	1,78	2,02	0,24
D_16414	1,75	0,17	0,18	0,01	1,28	1,23	-0,05

Kunstwerk ID	Q bovenstrooms model [m³/s]	Opstuwing model [m]	Opstuwing analytisch [m]	Vershil opstuwing [m]	Stroomsnelheid model [m/s]	Stroomsnelheid analytisch [m/s]	Vershil stroomsnelheid [m/s]
B_10890	44,59	0,07	0,03	-0,04	1,21	1,83	0,62
B_11086	31,96	0,15	0,09	-0,06	1,72	2,17	0,45
B_10575	50,70	0,17	0,13	-0,04	1,80	2,02	0,22
B_10893	4,71	0,25	0,28	0,03	1,23	1,16	-0,07
B_10888**	43,20	0,08	0,02	-0,05	1,21	1,16	-0,05
B_11809***	2,50	0,05	0,06	0,01	0,91	0,88	-0,03
B_10384	2,79	0,02	0,02	0,00	0,65	0,66	0,01
B_10213	2,98	0,19	0,23	0,04	1,64	1,51	0,13
S_96111	11,84	0,43	0,40	-0,03	1,49	3,21	1,72

*compound structure met 5 duikers naast elkaar

** Brug met pilaar

*** benedenstroomse waterhoogte hoger dan bovenstroomse waterhoogte in D-Hydro

Tabel 3.12: Vergelijking gemodelleerde afvoer en stroomsnelheid en analytisch berekende afvoer en stroomsnelheid van compound structures.

Kunstwerk ID	Q bovenstrooms model [m³/s]	Q analytisch [m³/s]	Vershil Q [m³/s]	Stroomsnelheid model [m/s]	Stroomsnelheid analytisch [m/s]	Vershil stroomsnelheid [m/s]	Opmerking
D_12875	12,25	9,69	2,56	1,22	0,96	-0,26	D_12875 & D_15520
D_15520	12,35	9,66	2,69	1,22	0,95	-0,27	D_12875 & D_15520
B_11284	31,68	36,92	-5,24	1,55	1,81	-0,26	Stuw boven brug
S_99336	5,38	6,28	0,90	0,53	0,64	0,11	Zij-overlaat
S_172593	11,87	10,16	-1,71	0,75	0,63	-0,14	Zij-overlaat
S_O_11284	-	-	-	-	-	-	Stuw boven brug
S_96338_1	4,65	2,26	-2,39	1,49	0,72	-0,77	S_96338_1 & S_96338_2 & S_96338_3
S_96338_2	4,28	2,08	-2,20	1,49	0,72	-0,77	S_96338_1 & S_96338_2 & S_96338_3
S_96338_3	3,11	1,51	-1,60	1,49	0,72	-0,77	S_96338_1 & S_96338_2 & S_96338_3

Tabel 3.13: Vergelijking gemodelleerde waterhoogte en stroomsnelheid en analytisch berekende waterhoogte en stroomsnelheid van meetgoten.

Kunstwerk ID	Q bovenstrooms model [m ³ /s]	Waterhoogte bovenstrooms model [m]	Waterhoogte analytisch [m]	Verschil waterhoogte [m]	Stroomsnelheid model [m/s]	Stroomsnelheid analytisch [m/s]	Verschil stroomsnelheid [m/s]
M_42882	3,09	0,57	0,70	0,13	1,82	3,16	-1,35
M_43488	2,51	0,84	0,70	-0,14	1,07	2,31	-1,24
M_43047	25,10	2,02	2,01	-0,01	2,31	2,64	-0,33

4 Gevoeligheidsanalyse parameters

Om inzicht te krijgen in de meest bepalende parameters voor de berekende opstuwing is een gevoeligheidsanalyse toegepast waarbij diverse parameters zijn gevarieerd. Hiervoor is een bereik aan parameterwaarden gebruikt om te onderzoeken hoe deze parameters de opstuwing beïnvloeden. Deze gevoeligheidsanalyse is toegepast op de analytisch berekende opstuwing, omdat hiermee makkelijk vele parameterwaardes doorgerekend konden worden. In het advies voor de verbetering van de kunstwerken worden de inzichten die de gevoeligheidsanalyse hebben opgeleverd vertaald naar concrete modelverbeteringen.

Tabel 4-1 geeft een overzicht van de input parameters die in D-HYDRO worden gebruikt. In de tabel wordt aangegeven waar deze parameters voorkomen in de analytische formules en wordt daarnaast de conclusie van de gevoeligheidsanalyse gepresenteerd.

Tabel 4.1: Overzicht kunstwerk parameters D-HYDRO in vergelijking met de analytische formules en resultaten gevoeligheidsanalyse.

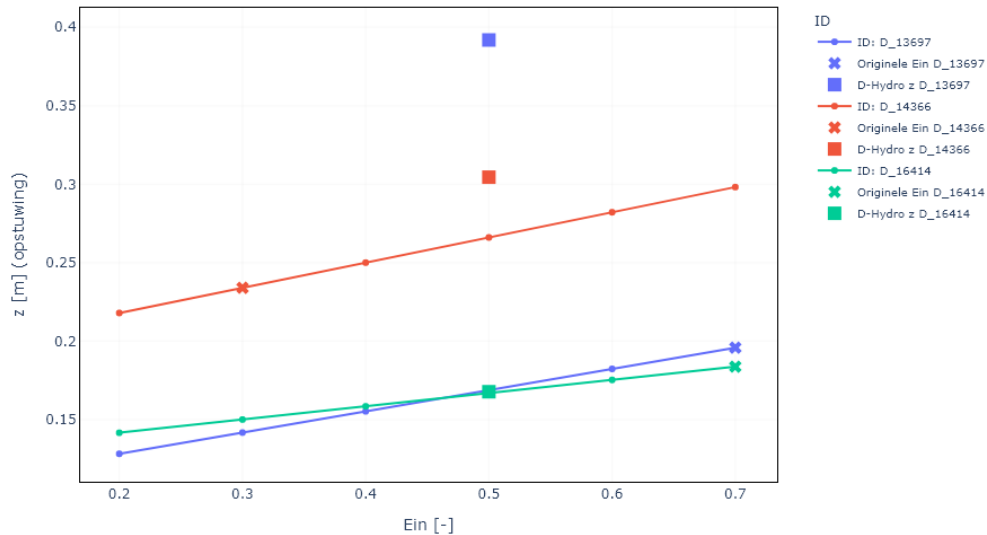
Kunstwerk	D-HYDRO + standaardwaarde	Analytische formule	Resultaten gevoeligheid
Duiker	Inlet loss coefficient = 0,5	ϵ_{in}	Beperkte invloed
	Outlet loss coefficient = 1,0	k	Zeer beperkte invloed
	Manning Friction value = 60 m ^{1/3} /s	K_M	Veel invloed
	relOpening = 1,0 lossCoeff = 1,0	ϵ_{bocht}	-
Brug	Inlet loss coefficient = 0,25	ϵ_{in}	Veel invloed
	Outlet loss coefficient = 0,25	k	Zeer beperkte invloed
	Manning Friction value = 25 m ^{1/3} /s	K_M	Veel invloed
Stuw	Correction coefficient = 1,0	m-waarde	Veel invloed
Onderlaat	Contraction Coefficient $\mu = 1,0$	C_d of C_e	Veel invloed
	Lateral Contraction $C_w = 1,0$		

De volgende paragrafen geven de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weer in grafieken. In deze grafieken zijn ook de coëfficiënten zichtbaar die D-HYDRO momenteel aanneemt met de opstuwing die het model berekend. Deze waardes uit D-HYDRO zijn aangeduid met een vierkant. De waardes die in paragraaf 3.2.7 zijn aangenomen om de opstuwing te berekenen zijn aangeduid met een kruisje in de figuren.

4.1 Gevoeligheidsanalyse duikers

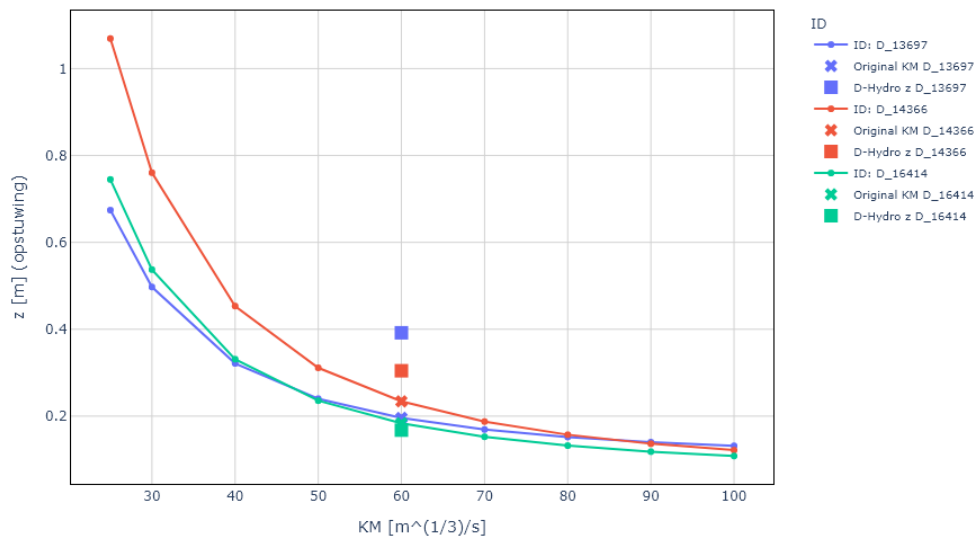
Voor duikers zijn de coëfficiënten ϵ_{in} [-], K_M [m^{1/3}/s] en k [-] beschouwd. Uit de resultaten blijkt dat de opstuwing afhankelijk is van zowel de intreeweewerstands coëfficiënt en de Manning ruwheidscoëfficiënt. Daarentegen blijkt de opstuwing nauwelijks gevoelig te zijn voor de waarde van k, die wordt gebruikt bij het bepalen van de uittreeweewerstand.

Opstuwing gevoeligheid van Duikers vs. ϵ_{in} (KM, k gefixeerd)



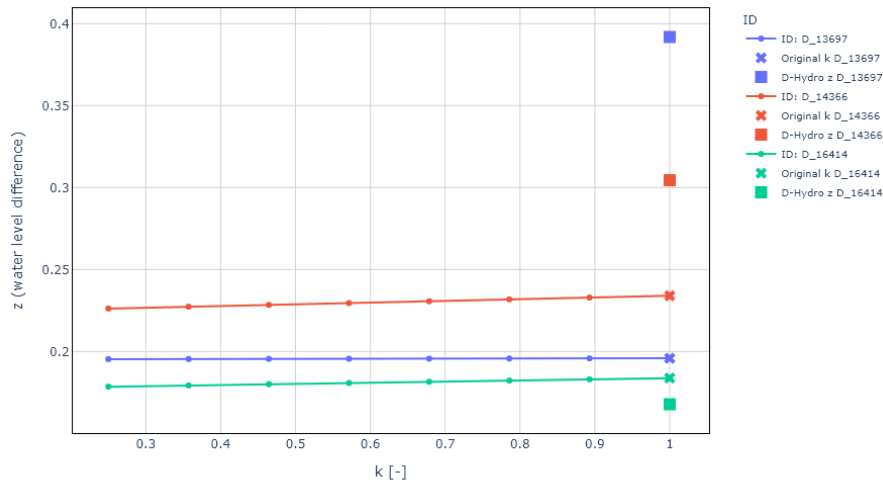
Figuur 4-1: Gevoeligheid van opstuwing van duikers vs. intreeweerstand coëfficiënt.

Opstuwing gevoeligheid van Duikers vs. KM (ϵ_{in} , k gefixeerd)



Figuur 4-2: Gevoeligheid van opstuwing van duikers vs. Mannings wandruwheidscoëfficiënt.

Opstuwing gevoeligheid van Duikers vs. k (ϵ_{in} , K_M gefixeerd)

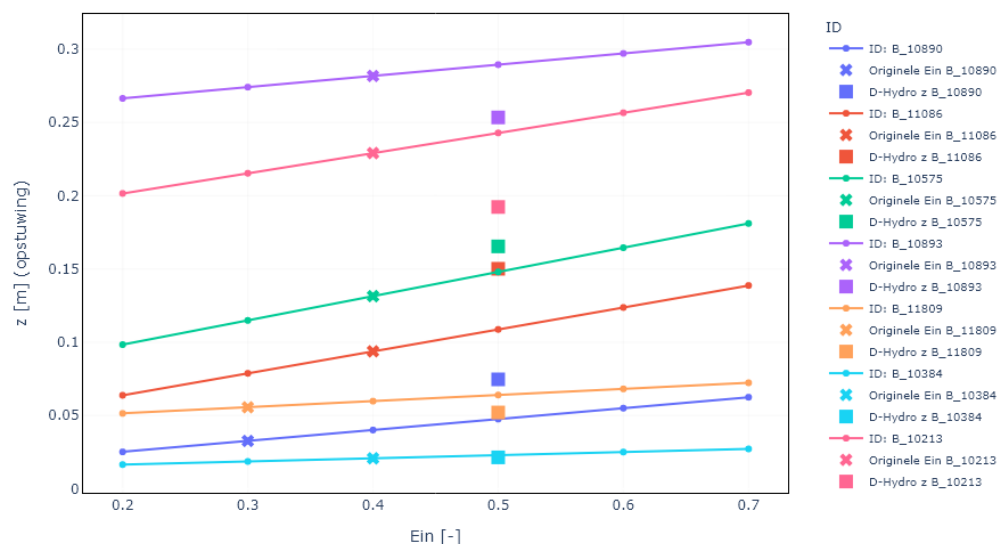


Figuur 4-3: Gevoeligheid van opstuwing van duikers vs. k (coëfficiënt afhankelijk van de vorm van uitstroomopening van duiker).

4.2 Gevoeligheidsanalyse Bruggen

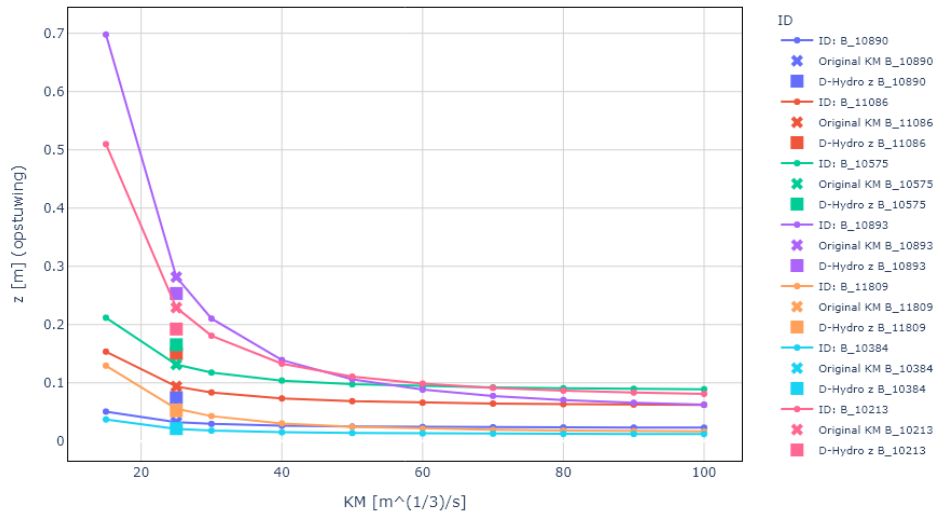
Voor bruggen, berekend met de formule van Gelok, zijn ook de coëfficiënten ϵ_{in} [-], K_M [$m^{1/3}/s$] en k [-] beschouwd. Uit de resultaten blijkt dat de opstuwing afhankelijk is van zowel de intreeweerstand coëfficiënt en de Manning ruwheidscoëfficiënt. Daarentegen blijkt de opstuwing nauwelijks gevoelig te zijn voor de waarde van k , die wordt gebruikt bij het bepalen van de uittreweerstand.

Opstuwing gevoeligheid van Bruggen vs. ϵ_{in} (K_M , k gefixeerd)



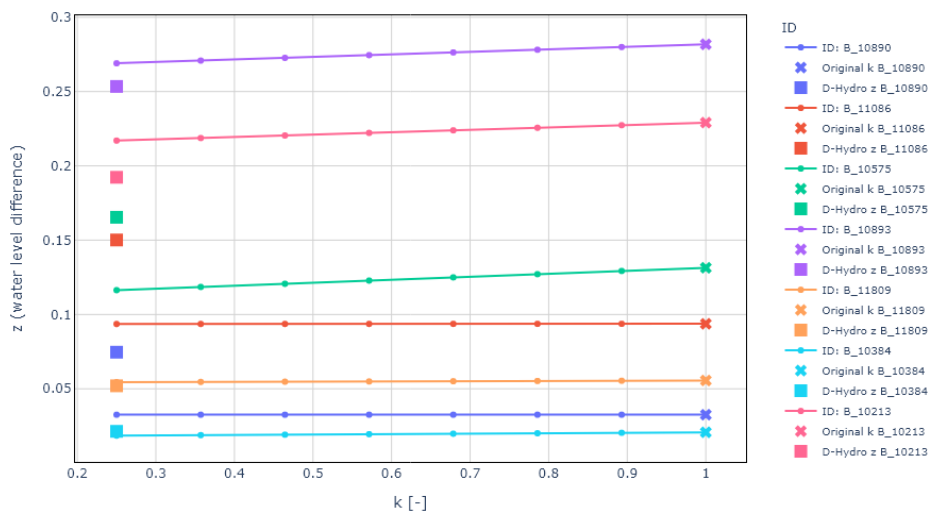
Figuur 4-4: Gevoeligheid van opstuwing van duikers vs. intreeweerstand coëfficiënt.

Opstuwung gevoeligheid van Bruggen vs. KM (ϵ in, k gefixeerd)



Figuur 4-5: Gevoeligheid van opstuwung van duikers vs. Mannings wandruwheidscoëfficiënt.

Opstuwung gevoeligheid van Bruggen vs. k (ϵ in, KM gefixeerd)

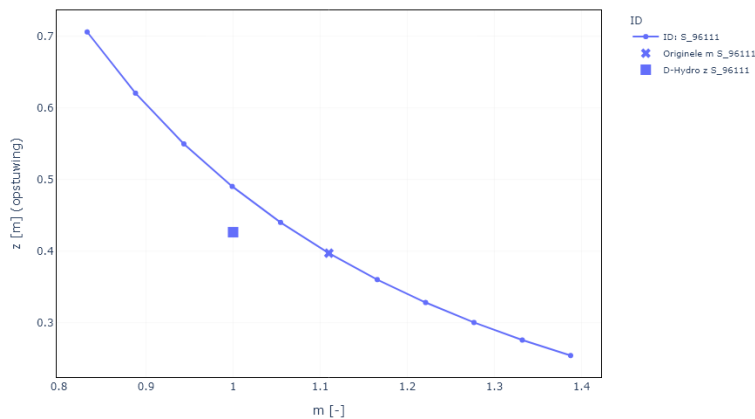


Figuur 4-6: Gevoeligheid van opstuwung van duikers vs. k (coëfficiënt afhankelijk van de vorm van uitstroomopening van duiker).

4.3 Gevoeligheidsanalyse stuwen

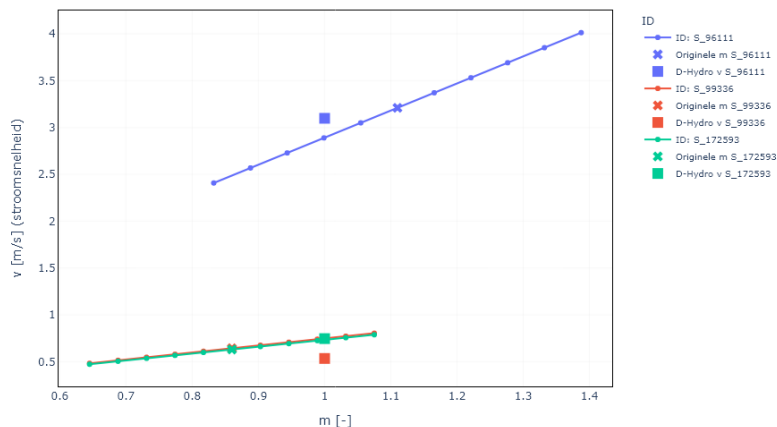
Voor stuwen is de m -waarde beschouwd, waarbij een factor is toegepast die varieert van 0,75 tot 1,25 op de oorspronkelijke aangenomen m -waarde. De m -waarde heeft een grote invloed op de berekende opstuwing.

Opstuwing gevoeligheid van Stuwen vs. m



Figuur 4-7: Gevoeligheid van opstuwing van stuwen vs. m .

Stroomsnelheidsgevoeligheid van Stuwen vs. m



Figuur 4-8: Gevoeligheid van stroomsnelheid van stuwen vs. m .

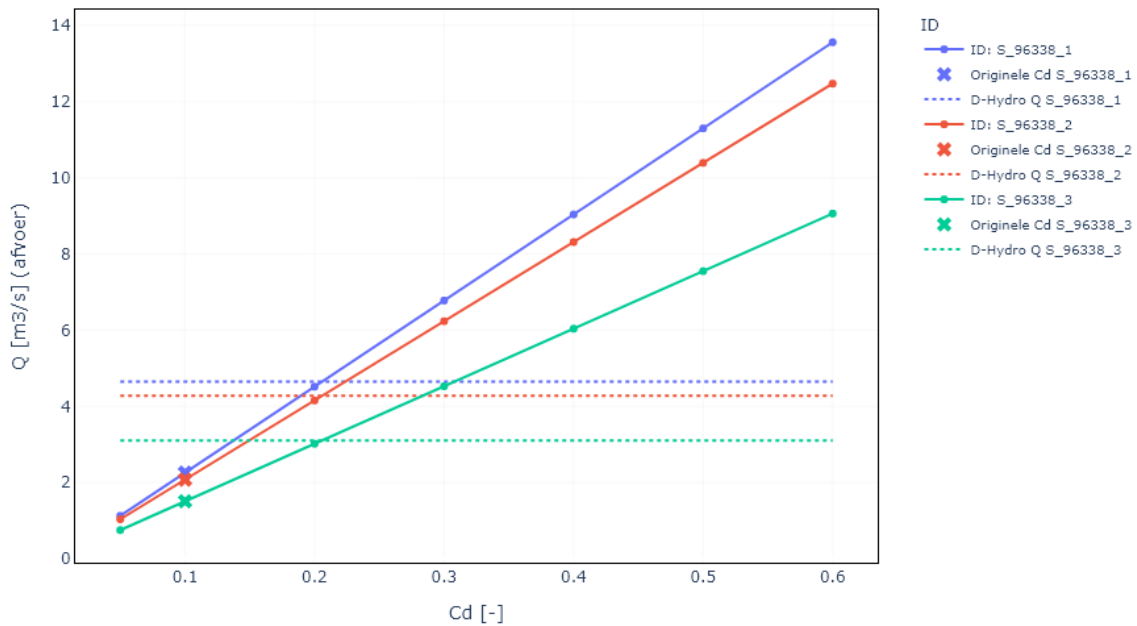
4.4 Gevoeligheidsanalyse onderlaten

Voor onderlaten is de correctie coëfficiënt C_d beschouwd. In het D-HYDRO scenario van Q140 en de bijhorende waterdieptes is er alleen sprake van onvolkomen onderlaten, daarom is er geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de effectieve debiet coëfficiënt C_e , die relevant is voor volkomen stroming.

De ontladingscoëfficiënt bij onderlaten is niet direct te herleiden tot de coëfficiënten die D-HYDRO hanteert voor het berekenen van de afvoer door een onderlaat. Om die reden is de door D-HYDRO berekende afvoer in de figuur weergegeven als een lijn.

Uit de figuur blijkt dat de analytisch berekende resultaten het D-HYDRO-resultaat snijden bij een waarde van $C_d = 0,2$, wat suggereert dat dit overeenkomt met de impliciete coëfficiënt die D-HYDRO in dit scenario toepast. Er is een lineair verband tussen de C_d -waarde en de afvoer.

Afvoer gevoeligheid van Onderlaten vs. C_d



Figuur 4-9: Afvoer gevoeligheid van onderlaten vs. C_d .

5 Advies verbeteren nauwkeurigheid schematisatie en parametrisatie kunstwerken

Om tot een gedegen en onderbouwd advies te komen op basis van de vergelijking tussen D-HYDRO en de analytische formules, is het essentieel helder inzicht te verkrijgen in de exacte rekenmethodes die D-HYDRO hanteert en de gebruikte analytische formules. Vervolgens dienen de eventuele verschillen in uitkomsten grondig te worden geanalyseerd en verklaard, zodat het uiteindelijke advies niet alleen stoelt op de resultaten van de vergelijking, maar ook op een goed begrip van de onderliggende oorzaken. In paragraaf 5.1 wordt een vergelijking tussen de formules van D-Hydro en de analytische formules gegeven. Ook zijn er meerdere sommen in D-HYDRO doorgerekend waarbij aanpassingen aan de kunstwerken zijn uitgevoerd om het advies mee op te bouwen, deze resultaten zijn zichtbaar in paragraaf 5.2.

5.1 Formules D-HYDRO in vergelijking met analytische formules

D-HYDRO gebruikt verschillende formules om de afvoer door kunstwerken te berekenen. Onderstaande paragrafen geven de formules weer die D-HYDRO gebruikt in vergelijking tot de analytische formules. De verschillen tussen de analytische berekeningen en de D-HYDRO berekening zijn hieronder kort opgesomd, in het vervolg van deze paragraaf wordt hier per type kunstwerk een onderbouwing voor gegeven:

- Voor afsluiters wordt standaard een extra verliesterm van 1 gebruikt in het D-HYDRO model, analytisch wordt deze term niet meegenomen;
- Voor duikers en bruggen gebruikt D-HYDRO het bovenstroomse natte oppervlak om de uittreeweerstand coëfficiënt, analytisch wordt het benedenstroomse natte oppervlak gebruikt;
- De weerstandscoefficiënt (μ) gemaximaliseerd is op 1 in D-HYDRO, analytisch geldt geen maximum;
- Het natte oppervlak van de benedenstroomse watergang van de kunstwerken wordt analytisch bepaald aan de hand van de berekende afvoer en stroomsnelheid in D-HYDRO, dit wijkt wat af van hoe D-HYDRO het natte oppervlak bepaalt;
- Voor stuwen wordt analytisch de snelheidshoogte niet meegenomen, in D-HYDRO wel;
- De gehanteerde formules voor de onderlaten verschillen;
- De onderzochte onderlaat heeft in het D-HYDRO model een lage kruinhoogte dan de bodem van de watergang, analytisch is de bodemhoogte van de watergang als kruinhoogte gehanteerd;
- Meetgoten worden in D-HYDRO als profielen ingevoerd, analytisch is hier een afvoerrelatie voor een trapeziumvormige meetgoot gebruikt.

Duikers

Voor duikers gebruikt D-HYDRO twee formules, afhankelijk van de stromingssituatie. Voor vrije stroming, toegepast wanneer $h_2 < z_{c2} + h_{c2}$:

$$Q = \mu \cdot A_{fc} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - (z_c + h_{c2}))} \quad \text{Vergelijking 5-1}$$

Voor verzonken stroming, toegepast wanneer: $h_2 \geq z_{c2} + h_{c2}$:

$$Q = \mu \cdot A_{fc} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \text{Vergelijking 5-2}$$

Waar,

Q [m³/s] = debiet

μ [-] = weerstandscoefficiënt

A_{fc} [m²] = natte oppervlak

Hierbij wordt het kleinste van de twee oppervlakken gebruikt: het natte oppervlak van de duiker aan de bovenstroomse zijde of het effectieve doorstroomoppervlak van de klep van de duiker.

g [m/s²] = zwaartekrachtsversnelling
 h_1 [m] = bovenstroomse waterstand
 h_2 [m] = benedenstroomse waterstand
 h_{c2} [m] = kritische benedenstroomse waterstand
 z_c [m] = bodemhoogte van de duiker

De weerstandscoefficiënt wordt berekend volgens de methode van Gelok (Paragraaf 3.1.1), waar gebruik wordt gemaakt van de intreeweerstand, wrijvingsweerstand, uittreeweerstand en een verliesterm voor de afsluiter. De verliesterm voor de afsluiter wordt berekend met:

$$\varepsilon_{afsluiter} = f \cdot \left(\frac{h_{afsluiter}}{h_{duiker}} \right) \quad \text{Vergelijking 5-3}$$

Waar f een lineaire functie is gedefinieerd door de invoervelden van de relatieve opening van de afsluiter (relOpening) en de bijhorende verliescoëfficiënt (lossCoeff).

In de situatie van Q140 is volgens de berekeningen er alleen sprake van verzonken stroming (zie Bijlage 0). De formule die D-HYDRO gebruikt komt overeen met de Gelok formule die in de analytische berekeningen worden toegepast. Uitzonder hierop is de verliesterm voor de afsluiter, welke analytisch niet wordt meegenomen (op 0 verondersteld). In het D-HYDRO model wordt met de huidige instelling de verliesterm voor de afsluiter altijd op 1 verondersteld

Een ander verschil tussen het D-HYDRO model en de analytische berekeningen betreft de manier waarop de uittreeweerstand coëfficiënt wordt bepaald. In de analytische methode wordt hiervoor het benedenstroomse natte oppervlak gebruikt, terwijl D-HYDRO in alle gevallen het bovenstroomse natte oppervlak hanteert. Daarnaast gebruikt D-HYDRO bij het berekenen van de uittreeweerstand een ander nat oppervlak van de watergang dan in de analytische formules, in de analytische formules wordt deze bepaald aan de uitkomsten van de stroomsnelheid en de afvoer uit D-HYDRO. Deze afwijkingen hebben invloed op de uitkomsten van het model in vergelijking tot de uitkomsten van de analytische formules.

Bruggen

In het D-HYDRO model worden bruggen gemodelleerd met een formule die overeenkomt met de formule van Gelok, zoals ook toegepast in de analytische berekeningen. De weerstandscoefficiënt bestaat uit bijdragen van de intreeweerstand, wrijvingsweerstand, uittreeweerstand en in het geval van een pilaarbrug een pilaarverlies coëfficiënt.

In de lijst van kunstwerken is één pilaarbrug aanwezig. In D-HYDRO is deze echter niet als een pilaarbrug gemodelleerd, waardoor het pilaarverlies niet wordt meegenomen in de berekening.

Zoals vermeld in paragraaf 3.1.2, geldt in dat in D-HYDRO de weerstandscoefficiënt (μ) gemaximaliseerd is op 1. Tabel 5-1 geeft een overzicht van de analytisch berekende weerstandscoefficiënten van de bruggen. Bij de analytische formules hebben is geen maximalisering van de weerstandscoefficiënt toegepast. Voor de bruggen met een weerstandscoefficiënt groter dan 1 blijkt uit de analytische berekening (fors) minder opstuwing dan in de modelberekeningen.

Tabel 5.1: Analytisch berekende weerstandscoefficienten van bruggen.

Brug ID	Weerstandscoefficiënt (μ [-])
B_10890	1,51
B_11086	1,26
B_10575	1,12
B_10893	0,52
B_10888	1,46
B_11809	0,87
B_10384	1,02
B_11284	1,17
B_10213	0,77

De berekening van bruggen in D-HYDRO tonen verder dezelfde verschillen ten opzichte van de analytische methode als bij duikers; het gebruik van verschillende natte oppervlakken bij het bepalen van de uittreeweerstand.

Stuwen en onderlaten

De volgende formules worden in D-HYDRO gebruikt om de afvoer door stuwen en onderlaten te berekenen.

Volkomen stuw:

$$Q = C \cdot b \cdot 1,7 \cdot (E_1 - z_s)^{3/2} \quad \text{Vergelijking 5-4}$$

Onvolkomen stuw:

$$Q = C \cdot b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (E_1 - (z_s + h_2))} \quad \text{Vergelijking 5-5}$$

Volkomen onderlaat:

$$Q = \mu \cdot C \cdot b \cdot h_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (E_1 - (z_s + h_g \cdot \mu))} \quad \text{Vergelijking 5-6}$$

Onvolkomen onderlaat:

$$Q = \mu \cdot C \cdot b \cdot h_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (E_1 - (z_s + h_2))} \quad \text{Vergelijking 5-7}$$

Waar,

Q [m³/s] = debiet

μ [-] = afvoercoëfficiënt

C [-] = Contractiecoëfficiënt

B [m] = stuwbreedte

g [m/s²] = zwaartekrachtsversnelling

h_2 [m] = benedenstroomse waterstand boven de stuwkruin

h_g [m] = openingshoogte van de schuif

z_s [m] = bodemhoogte van de stuwkruin

E_1 [m] = Totale energiehogte aan de bovenstroomse zijde

Voor stuwen is de formule voor analytische berekeningen vergelijkbaar met de methode die in D-HYDRO wordt toegepast. Het verschil is dat D-HYDRO rekent met de bovenstroomse energiehoogte, terwijl analytisch wordt aangenomen dat de bovenstroomse waterhoogte gelijk is aan de energiehoogte. Hierbij is verondersteld dat de snelheidshoogte $v^2/2g$ verwaarloosbaar is.

De formules die D-HYDRO gebruikt en de analytische formules zijn niet één-op-één met elkaar te vergelijken. De analytische onderlaatformules gaan uit van een directe relatie tussen waterhoogte en debiet, zonder correctie voor snelheidshoogte of energieverlies. D-HYDRO daarentegen gebruikt de energie-hoogte en past vormafhankelijke coëfficiënten toe voor onderlaat berekeningen. In het geval van een onvolkomen onderlaat maakt de analytische formule gebruik van een correctie coëfficiënt C_d , waarin de hoogte van de onderlaat en de benedenstroomse waterhoogte zijn verwerkt. D-HYDRO daarentegen maakt gebruik van twee coëfficiënten en neemt de benedenstroomse waterhoogte en vormen van de onderlaat mee in de formule. Hierdoor is directe vergelijking tussen de analytisch gebruikte coëfficiënt C_d en de coëfficiënten die D-HYDRO gebruikt niet mogelijk.

Daarnaast merken we op dat voor de onderzochte onderlaten (S_96338), de bodemhoogte van de watergang in D-HYDRO hoger is dan de bodemhoogte van de onderlaat. D-HYDRO houdt hier bij de berekening van de opstuwing door de onderlaten geen rekening mee, en rekent met de opgegeven bodemhoogte van de onderlaat. In de analytische berekening is de bodemhoogte van de watergang gehanteerd.

Meetgoten

In D-HYDRO worden de meetgoten niet als een los kunstwerk beschouwd, maar wordt de opstuwing op de watergang berekend door het profiel. De uitkomsten zijn dan ook niet 1-op-1 te vergelijken.

5.2 Effect doorvoeren aanpassingen in model

Er zijn meerdere sommen in D-HYDRO doorgerekend waarbij aanpassingen aan de kunstwerken zijn uitgevoerd om het advies mee op te bouwen. De volgende modelvarianten zijn doorgerekend, met de bijhorende verschillen ten opzichte van het huidige model:

- De sifons met ID D_13697 zijn aangepast naar sifons zonder afsluiter, waarmee impliciet de weerstand van de afsluiter op 0 is gezet;
- De m-waarden van de stuwen zijn aangepast, gebaseerd op de vorm van de stuw conform de analytische berekeningen;
- Voor de duikers en de bruggen zijn de intreeweerstand coëfficiënten aangepast, afhankelijk van de vorm van de inlaatconstructie conform de analytische berekeningen;
- Voor duikers en bruggen zijn de wandruwheden (K Manning) aangepast, afhankelijk van het materiaal, zie onderstaande Tabel 5-2.

Tabel 5.2: Inschatting weerstand K Manning bruggen en duikers.

Kunstwerk ID	K Manning huidig in model	Aanpassing k Manning	Onderbouwing
D_13697*	60	90	Duiker is recht en schoon
D_14366	60	75	Duiker is wel recht en schoon, maar stenen ipv beton
D_16414	60	70	Wanden schoon beton, bodem wel wat vuil.
D_12875 & D_15520	60	40	Gegolfde plaatstalen duikers, kleine meerplatige duikers

Kunstwerk ID	K Manning huidig in model	Aanpassing k Manning	Onderbouwing
B_10890	25	40	Wanden ruwe stenen, bovenkant glad beton. Bodem weerstand 25. Wanden weerstand 25, bovenkant brug 90. Wanden + bodem (over)grote deel in nat profiel
B_11086	25	45	Idem als B_10890, maar bovendeck meer bereikt in berekening
B_10575	25	45	Gladde stenen wanden + bovenkant (75), bodem 25. Bovenkant brug nog niet helemaal bereikt in berekening
B_10893	25	35	Gladde stenen wanden + bovenkant (75), bodem 25. Bovenkant brug nog niet bereikt in berekening
B_10888**	25	35	Bodem weerstand 25, zijkant en bovenkant brug glad stenen (75) bovenkant brug nog niet bereikt
B_11809	25	35	Bodem weerstand 25, zijkant en bovenkant brug glad stenen (75) bovenkant brug nog niet bereikt
B_10384	25	35	Bodem weerstand 25, zijkant en bovenkant brug glad stenen (75) bovenkant brug nog niet bereikt
B_10213	25	30	Bodem weerstand 25, zijkant en bovenkant brug glad stenen (75) bovenkant brug nog niet bereikt
B_11284	25	40	Bodem weerstand 25, zijkant en bovenkant brug beton (90), bovenkant nog niet bereikt

Tabel 5-3 geeft de resultaten weer van de doorgerekende aanpassingen in D-HYDRO. Deze tabel geeft de opstuwing of de afvoer van de kunstwerken weer van de D-HYDRO modellen met aanpassingen in vergelijking tot de analytisch berekende opstuwing of afvoer en het huidig D-HYDRO zonder aanpassingen.

Op basis van de doorgerekende modelvarianten in D-HYDRO blijkt dat niet alle parameteraanpassingen evenveel invloed hebben op de modelresultaten. Het verwijderen van de afsluitklep bij de sifons (D_13697) heeft een duidelijke invloed op de opstuwing. Ook het aanpassen van de m-waarden van de stuwen, op basis van hun vorm, leidt tot merkbare verschillen ten opzichte van het oorspronkelijke model. Daarentegen toont de aanpassing van de intreeweerstandscoefficienten bij duikers en bruggen slechts weinig effect op de resultaten. De aanpassing van de Kmanning van bruggen en duikers heeft maar beperkt invloed op de resulterende opstuwing. Bij de bruggen waarvoor de weerstandscoefficient (μ) groter is dan 1 is er geen effect zichtbaar van de aangepaste weerstand, omdat de weerstandscoefficient nog steeds boven de 1 blijft.

Tabel 5.3: Resultaten van sommen in D-HYDRO in vergelijking tot analytische berekeningen en huidig D-HYDRO model.

Kunstwerk ID	Aanpassing D-HYDRO	D-HYDRO aanpassing		Analytisch		Huidig D-HYDRO model	
		Opstuwing [m]	Afvoer [m³/s]	Opstuwing [m]	Afvoer [m³/s]	Opstuwing [m]	Afvoer [m³/s]
D_13697 & D_13697_2 & D_13697_3 & D_13697_4 & D_13697_5	Sifons zonder terugslagklep	0,27	-	0,20	-	0,39	-
S_96111	m-waarde op 1,1 (als)	0,35	-	0,40	-	0,43	-

Projectgerelateerd

		D-HYDRO aanpassing		Analytisch		Huidig D-HYDRO model	
Kunstwerk ID	Aanpassing D-HYDRO	Opstuwing [m]	Afvoer [m³/s]	Opstuwing [m]	Afvoer [m³/s]	Opstuwing [m]	Afvoer [m³/s]
	onderlaat in model)						
S_99336	m-waarde op 0,86		6,16		6,28		5,38
S_172593	m-waarde op 0,86		12,40		10,16		11,87
D_13697 & D_13697_2 & D_13697_3 & D_13697_4 & D_13697_5	$\epsilon_{in} [-] = 0,7$	0,42		0,20		0,39	
D_12875	$\epsilon_{in} [-] = 0,7$		12,09		9,69		12,25
D_15520	$\epsilon_{in} [-] = 0,7$		12,21		9,66		12,35
B_10890	$\epsilon_{in} [-] = 0,3$	0,07		0,03		0,07	
B_11086	$\epsilon_{in} [-] = 0,4$	0,15		0,09		0,15	
B_10575	$\epsilon_{in} [-] = 0,4$	0,17		0,13		0,17	
B_10893	$\epsilon_{in} [-] = 0,4$	0,26		0,28		0,25	
D_14366	$\epsilon_{in} [-] = 0,3$	0,29		0,23		0,30	
D_16414	$\epsilon_{in} [-] = 0,7$	0,18		0,18		0,17	
B_11809	$\epsilon_{in} [-] = 0,3$	0,05		0,06		0,06	
B_10384	$\epsilon_{in} [-] = 0,4$	0,02		0,02		0,02	
B_10213	$\epsilon_{in} [-] = 0,4$	0,20		0,23		0,19	
D_13697*	$K_M [m^{1/3}/s] = 90$	0,34		0,20		0,39	
D_14366	$K_M [m^{1/3}/s] = 75$	0,27		0,23		0,30	
D_16414	$K_M [m^{1/3}/s] = 70$	0,15		0,18		0,17	
D_12875	$K_M [m^{1/3}/s] = 40$	12,21			9,69		12,25
D_15520	$K_M [m^{1/3}/s] = 40$	12,31			9,66		12,35
B_10890	$K_M [m^{1/3}/s] = 40$	0,07		0,03		0,07	
B_11086	$K_M [m^{1/3}/s] = 45$	0,15		0,09		0,15	
B_10575	$K_M [m^{1/3}/s] = 45$	0,17		0,13		0,17	
B_10893	$K_M [m^{1/3}/s] = 35$	0,19		0,28		0,25	
B_10888**	$K_M [m^{1/3}/s] = 35$	0,08		0,02		0,08	
B_11809	$K_M [m^{1/3}/s] = 35$	0,04		0,06		0,05	
B_10384	$K_M [m^{1/3}/s] = 35$	0,02		0,02		0,02	
B_10213	$K_M [m^{1/3}/s] = 30$	0,17		0,23		0,19	
B_11284	$K_M [m^{1/3}/s] = 40$	31,68			36,92		31,68

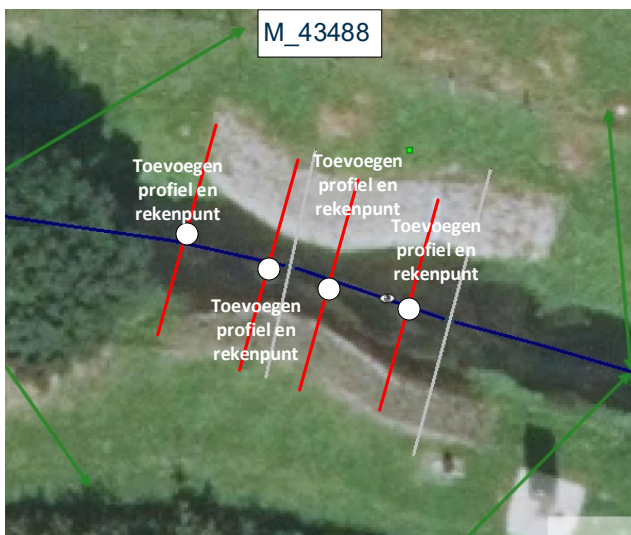
5.3 Advies aanpassing kunstwerken

Op basis van dit onderzoek worden de volgende aanpassingen aan het D-HYDRO model geadviseerd:

- Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de waarde voor de wandruwheid (K Manning) van bruggen en duikers sterk bepalend is voor de berekende opstuwing. In het D-HYDRO model is voor alle bruggen een weerstandswaarde van 25 en voor duikers 60 aangehouden. Het wordt aanbevolen om de K-Manning waarde op basis van het materiaal van het kunstwerk vast te stellen (zie Tabel 3-5 en Tabel 3-6), ook voor de niet onderzochte kunstwerken. Bijvoorbeeld B_10337, dit is een golfplaten brug maar heeft dezelfde weerstand als de andere bruggen;
- De weerstandscoefficiënt voor bruggen en duikers is gemaximaliseerd in D-HYDRO op 1. Voor 6 van de 9 onderzochte bruggen geldt dat de weerstandscoefficiënt groter is dan 1 wanneer deze analytisch wordt nagerekend. De invloed op de berekende opstuwing is fors, daarom wordt geadviseerd om voor alle bruggen in het model de weerstandscoefficiënt te berekenen;
 - Helaas is er geen optie in D-HYDRO, zoals in SOBEK, om een weerstandsknoop op te nemen. Een echte oplossing om de opstuwing bij deze bruggen beter te berekenen is er dus (nog) niet.
- Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de m-waardes van stuwen veel invloed hebben op de berekende opstuwing en afvoer. De resultaten van de sommen in D-HYDRO, waarbij de m-waardes zijn aangepast, bevestigen dat deze parameter sterk bepalend is voor zowel de opstuwing als de afvoer. Momenteel wordt in het D-HYDRO model voor alle stuwen standaard een m-waarde van 1 gehanteerd. Het wordt aanbevolen om de m-waardes per stuw aan te passen op basis van de vorm van de stuw (zie Tabel 3-9);
- Corrigeren bodem watergang of kruinhoogte onderlaten; in het model heeft de onderzochte onderlaat een lagere kruinhoogte dan de bodemhoogte (S_96338_1, S_96338_2 en S_96338_3). Onderzoek of de bodemhoogte van de watergang of de kruinhoogte van de onderlaat niet correct is opgenomen in het model;
 - Omdat de bodemhoogte hoger ligt dan de kruinhoogte in D-HYDRO, leidt dit tot een onderschatting van het hydraulisch verval en dus van de afvoer en de stroomsnelheid. In het geval van de onderlaten met ID S_96338 leidt een berekening vanaf de kruinhoogte tot ongeveer een 9% hogere afvoer en stroomsnelheid dan de berekening vanaf de hoger gelegen bodemhoogte.
- Pas de meetgotenprofielen aan zodat ze beter aansluiten bij de praktijk. Leg de rekenpunten en profielen bij de meetgoten beter, zodat de waterstanden en afvoeren beter kunnen worden geanalyseerd. Zie Figuur 5-1;
- Brug 10893: aanpassen profiel. Nu is de hele boog meegenomen, maar in werkelijkheid neemt wordt dit halverwege een rechthoekige brug, Zie Figuur 5-2;
- Pas de weerstandsterm van de afsluiters aan, deze is in het model nu standaard aangenomen op 1. Pas deze waarde aan op basis van de opening van de afsluiter. Een nadere analyse is nodig per afsluiter om geschikte waardes hiervoor te bepalen. Specifiek voor de sifons met code 13697 heeft het waterschap aangegeven dat er in praktijk meer opstuwing optrad dan volgens de theorie en dat met de weerstandswaarde van 1 voor de afsluiter de metingen goed benaderd werden.

De hierboven genoemde adviespunten zullen het grootste effect hebben op de resultaten. Hieronder volgen nog overige adviespunten/constateringen die minder effect hebben:

- In deze studie is specifiek gekeken welke intreeweerstand het beste passen bij de kunstwerken. In het D-HYDRO model is voor alle kunstwerken de intreeweerstand aangenomen op 0.5. Het advies is om met de in deze studie bepaalde intreeweerstand (zie Tabel 3-3 en Tabel 3-4) te rekenen en deze methodiek ook toe te passen op de niet onderzochte kunstwerken;
- D-HYDRO gebruikt de bovenstroomse natte oppervlakte voor het bepalen van de uitstroomweerstand. Dit lijkt niet logisch, maar dit is geen instelling die aan te passen is in D-HYDRO. Naar verwachting is het effect hiervan in extreme situaties beperkt, omdat dan de kunstwerken vaak geheel gevuld zijn.



Figuur 5-1: Advies aanpassingen meetgoten.



Figuur 5-2: Foto's brug 10893.

6 Opstuwing stedelijke kernen

In dit hoofdstuk wordt de methodologie en de resultaten voor de opstuwing van de stedelijke kernen weergegeven.

6.1 Methodologie

Tabel 6-1 toont een overzicht van de stedelijke kernen waarvoor de opstuwing per stedelijke kern is berekend. Deze selectie is gebaseerd op de bevolkingskernen van het CBS uit 2021. Binnen deze stedelijke kernen hebben we de watergangen opgedeeld in trajecten. Een traject ontstaat wanneer een watergang zich splitst.

Tabel 6.1: Overzicht stedelijke kernen.

Stedelijke kernen	
1.	Bunde
2.	Rothem – Tussen de Bruggen
3.	Meerssen
4.	Houthem
5.	Valkenburg
6.	Schin op geul
7.	Gulpen
8.	Partij
9.	Wahlwiller
10.	Nijswiller
11.	Mechelen
12.	Eys
13.	Simpelveld

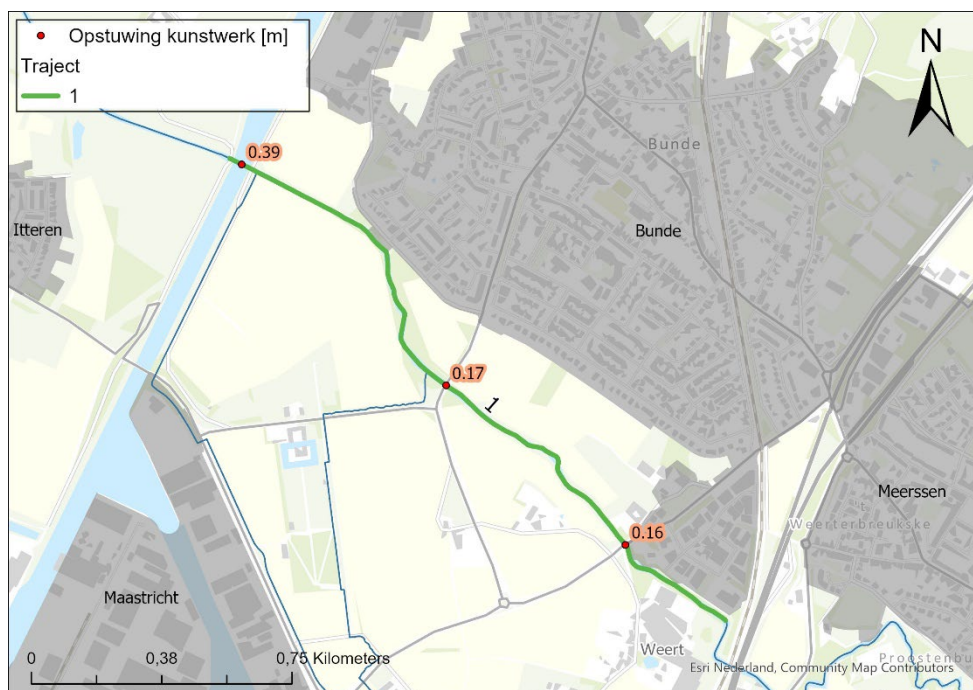
De opstuwing in de stedelijke kernen is berekend met behulp van D-HYDRO, waarbij scenario Q140 is toegepast. Hiervoor is het originele D-HYDRO model gebruikt, nog zonder de aanpassingen zoals geadviseerd in hoofdstuk 4. Voor elke stedelijke kern hebben we de opstuwing van alle aanwezige kunstwerken afzonderlijk bepaald. Daarnaast is per traject binnen elke kern de totale opstuwing berekend, evenals het bodem verhang en het totale verhang.

6.2 Resultaten opstuwing per stedelijke kern

De volgende figuren en tabellen tonen de opstuwing van kunstwerken die zich in de stedelijke kern bevinden. De resultaten zijn weergegeven per stedelijke kern. In de figuren is de opstuwing per kunstwerk aangegeven in meters. De tabellen geven per traject binnen de stedelijk kern een overzicht van:

- De lengte van het traject;
- Het verschil in waterhoogte tussen begin en einde van het traject;
- Het waterverhang van het traject;
- Het bodemhoogte verschil tussen begin en einde van het traject;
- Het bodemverhang van het traject;
- Een opsomming van de opstuwing door alle kunstwerken binnen dat traject.

6.2.1 Bunde

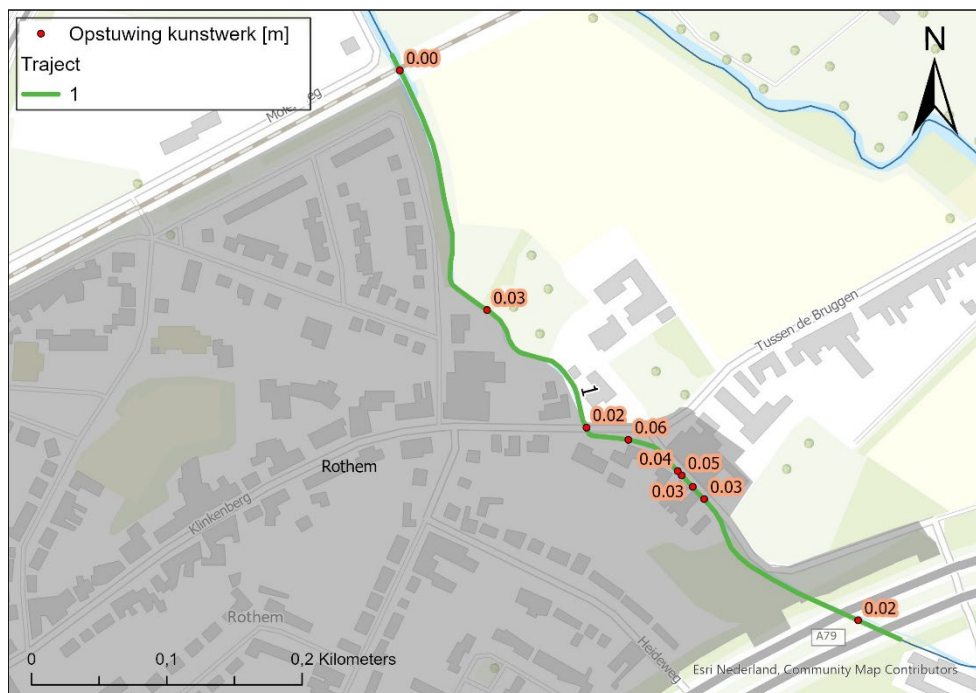


Figuur 6-1: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Bunde met trajectnummers.

Tabel 6.2: Opstuwing stedelijke kern Bunde.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	WATERVERHANG [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	2,84	3,93	1,39	4,22	1,49	0,71

6.2.2 Rothem

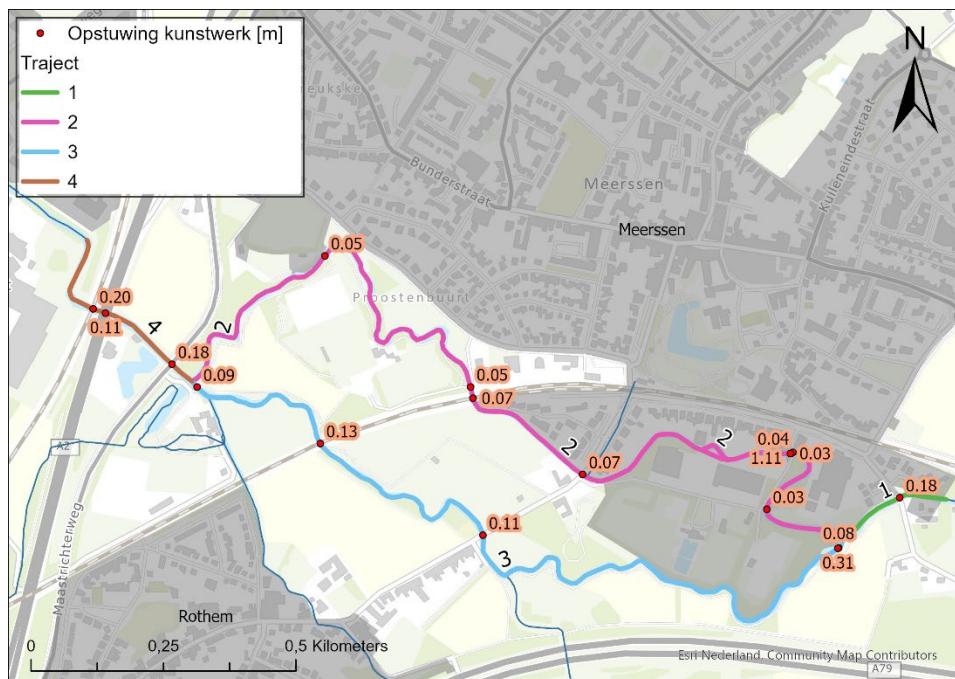


Figuur 6-2: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Rothem met trajectnummer.

Tabel 6.3: Opstuwing stedelijke kern Rothem.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waternverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,63	1,69	2,71	2,48	3,96	0,28

6.2.3 Meerssen

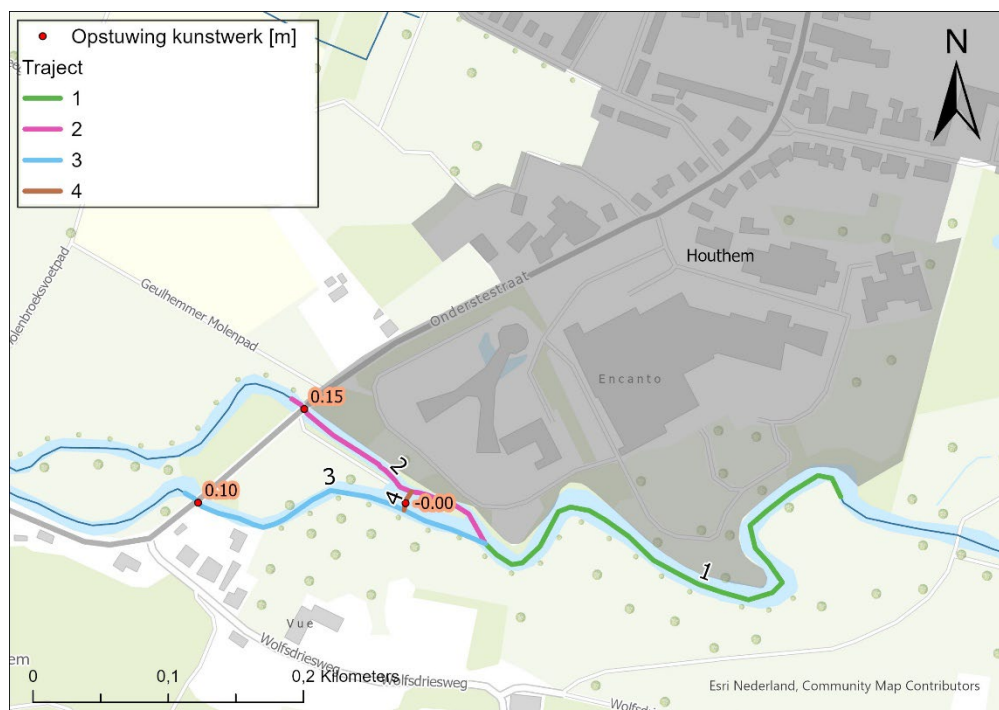


Figuur 6-3: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Meerssen met trajectnummers.

Tabel 6.4: Opstuwing stedelijke kern Meerssen.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waternverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,19	0,58	3,01	0,29	1,50	0,18
2	2,03	3,47	1,71	4,62	2,28	1,46
3	1,68	3,47	2,07	1,78	1,06	0,72
4	0,40	1,24	3,10	0,93	2,33	0,49

6.2.4 Houthem

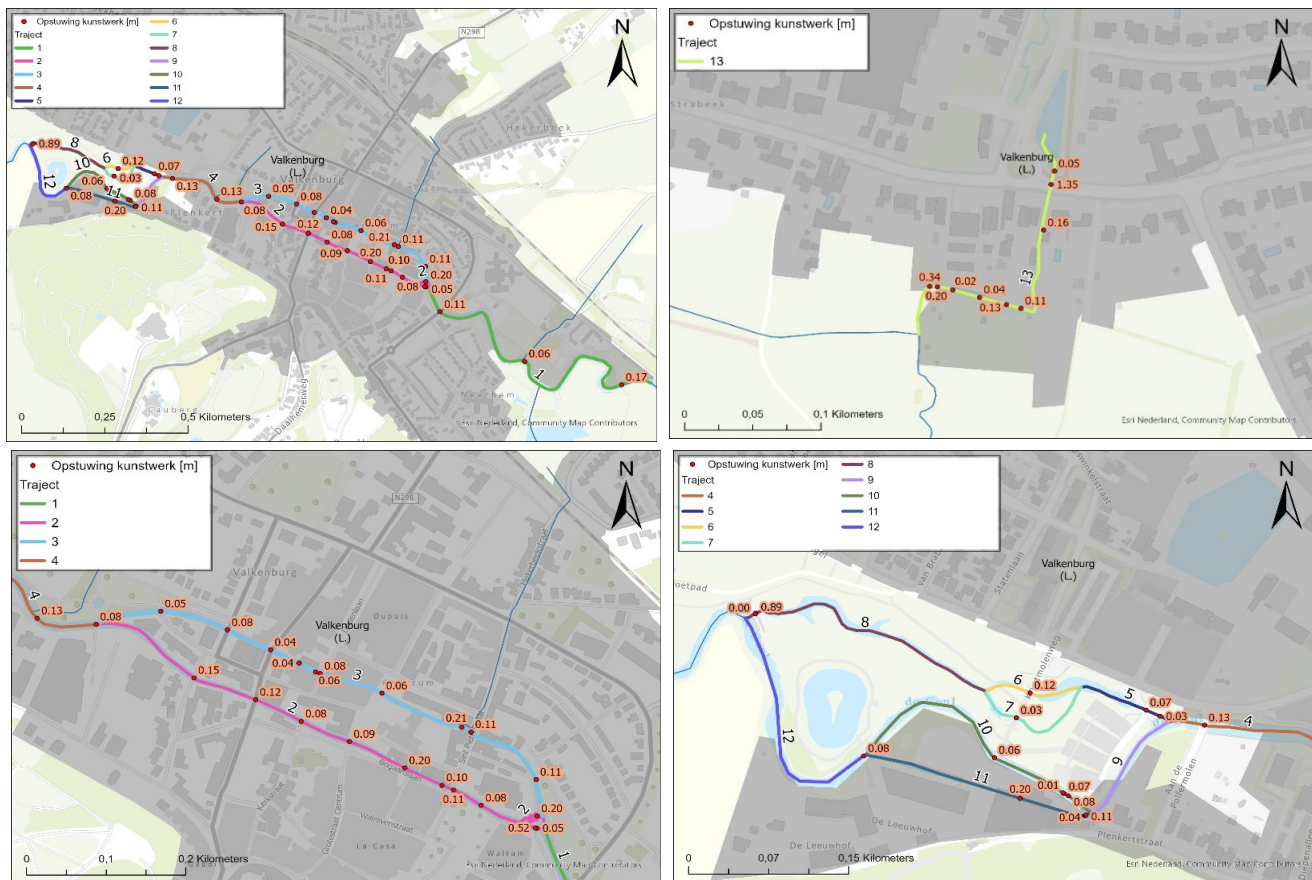


Figuur 6-4: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Houthem met trajectnummers.

Tabel 6.5: Opstuwing stedelijke kern Houthem.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waternverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,39	0,45	1,15	0,63	1,61	x
2	0,17	0,65	3,74	-0,61	-3,47	0,15
3	0,24	0,57	2,34	-1,17	-4,79	0,10
4	0,02	0,00	0,00	0,78	51,87	0,00

6.2.5 Valkenburg

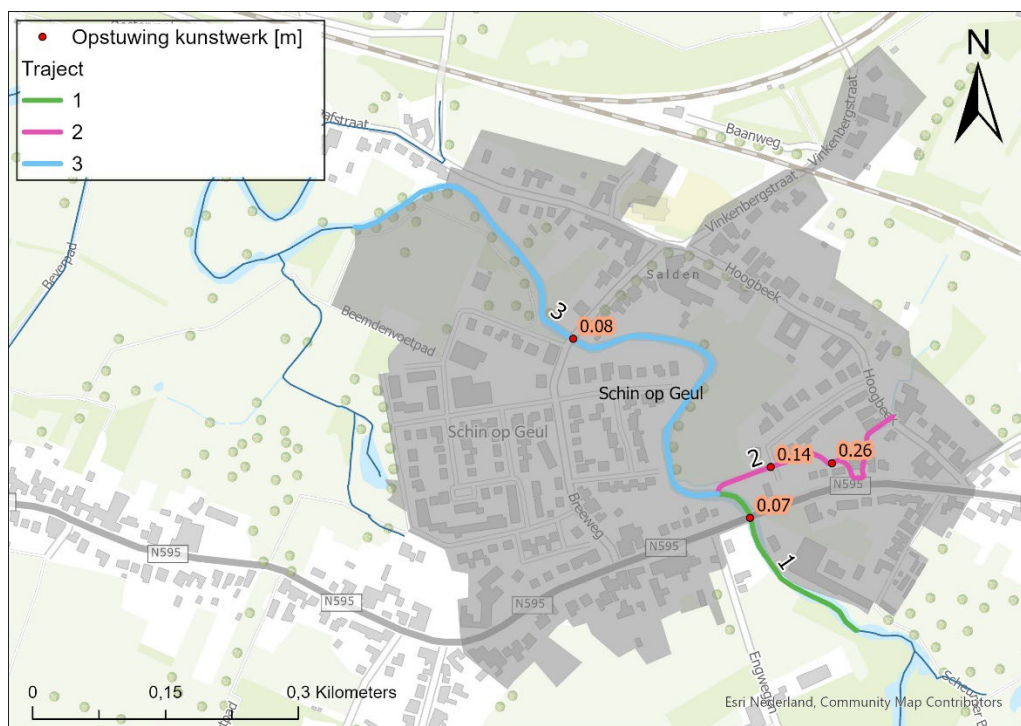


Figuur 6-5: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Valkenburg met trajectnummers.

Tabel 6.6: Opstuwing stedelijke kern Valkenburg.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waterverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	1,05	1,50	1,43	1,89	1,81	0,34
2	0,72	1,96	2,73	2,05	2,86	1,72
3	0,66	1,99	2,99	2,85	4,29	0,95
4	0,28	0,94	3,35	0,50	1,78	0,47
5	0,09	0,27	3,02	-1,61	-17,88	0,09
6	0,10	0,15	1,57	0,33	3,50	0,12
7	0,13	0,15	1,10	0,33	2,52	0,03
8	0,26	0,94	3,65	2,76	10,80	0,89
9	0,12	0,40	3,35	0,56	4,71	x
10	0,27	0,60	2,20	0,07	0,24	0,24
11	0,22	0,60	2,74	0,07	0,30	0,35
12	0,24	0,35	1,45	0,86	3,52	0,08
13	0,26	3,17	12,09	2,05	7,83	2,41

6.2.6 Schin op Geul

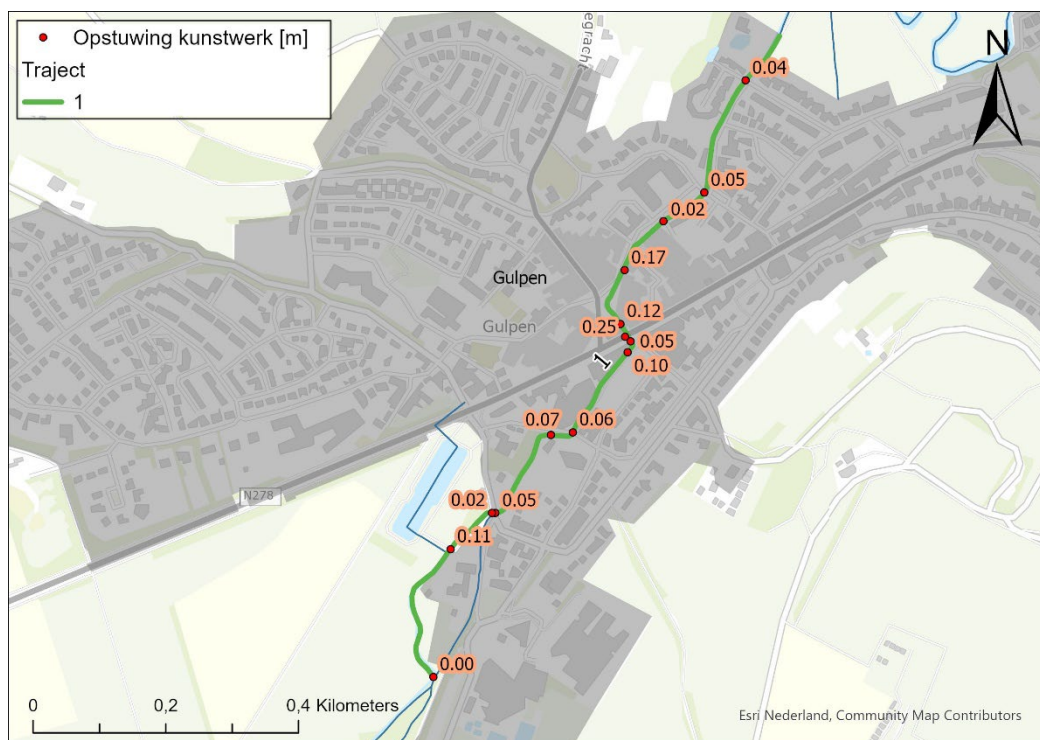


Figuur 6-6: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Schin op Geul met trajectnummers.

Tabel 6.7: Opstuwing stedelijke kern Schin op Geul.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waterniveauverhang [m/km]	Bodemverschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,23	0,45	1,92	0,24	1,02	0,07
2	0,28	0,45	1,58	1,58	5,57	0,40
3	0,73	1,37	1,87	1,86	2,54	0,08

6.2.7 Gulpen

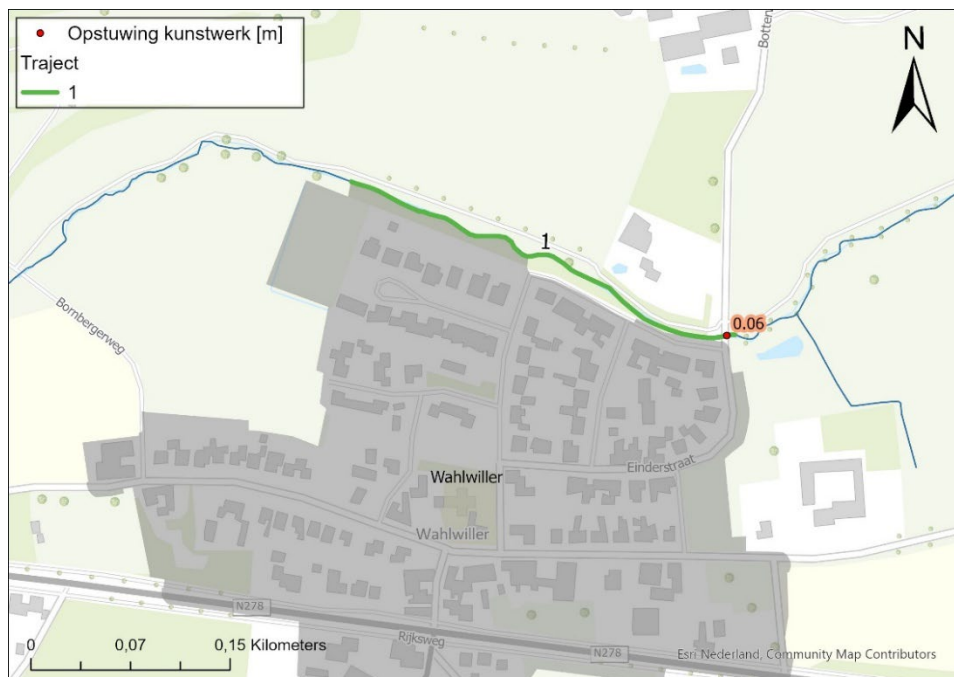


Figuur 6-7: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Gulpen met trajectnummers.

Tabel 6.8: Opstuwing stedelijke kern Gulpen.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waternverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	1,24	6,80	5,46	7,84	6,30	1,25

6.2.9 Wahlwiller

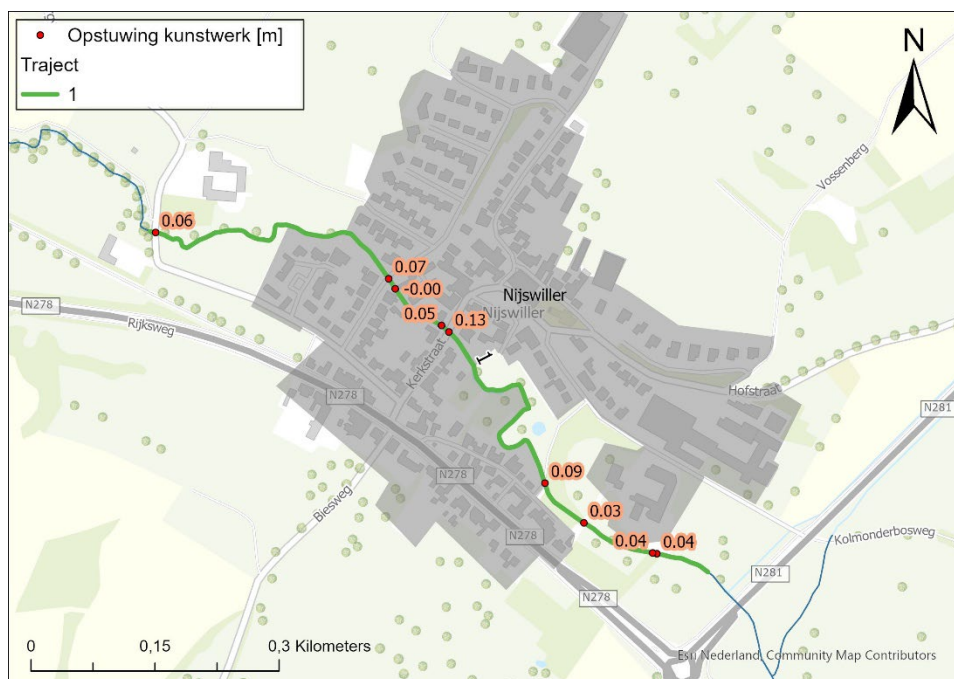


Figuur 6-9: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Wahlwiller met trajectnummers.

Tabel 6.10: Opstuwing stedelijke kern Wahlwiller.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waterniveau [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,33	1,52	4,65	1,74	5,31	0,06

6.2.10 Nijswiller

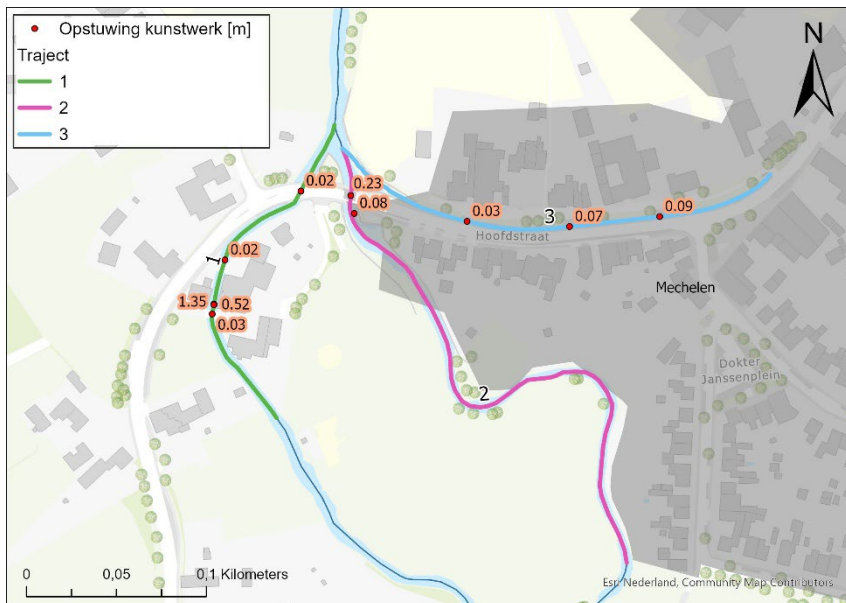


Figuur 6-10: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Nijswiller met trajectnummers.

Tabel 6.11: Opstuwing stedelijke kern Nijswiller.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waternverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
0,99	5,74	5,80	5,65	5,71	0,51	0,99

6.2.11 Mechelen

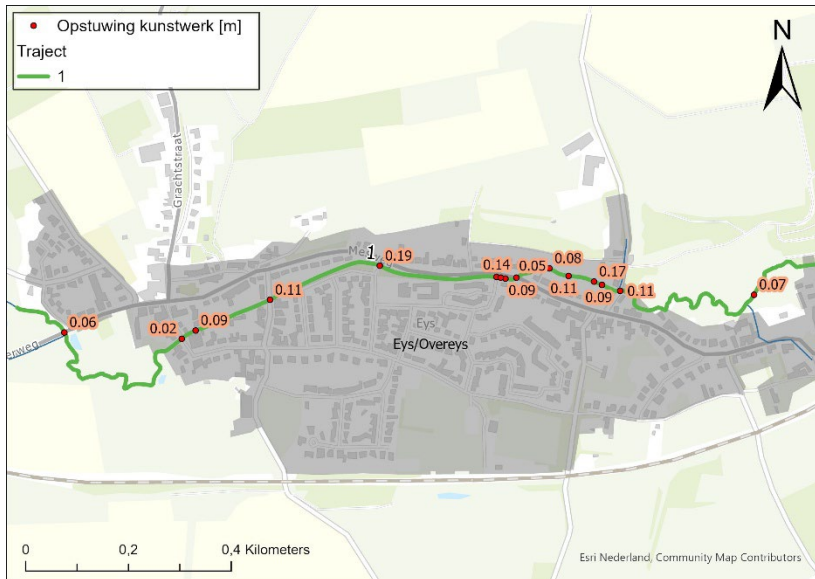


Figuur 6-11: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Mechelen met trajectnummers.

Tabel 6.12: Opstuwing stedelijke kern Mechelen.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waternverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,21	2,04	9,79	2,59	12,44	1,93
2	0,36	1,41	3,93	1,17	3,25	0,31
3	0,26	0,81	3,12	2,07	7,98	0,19

6.2.12 Eys

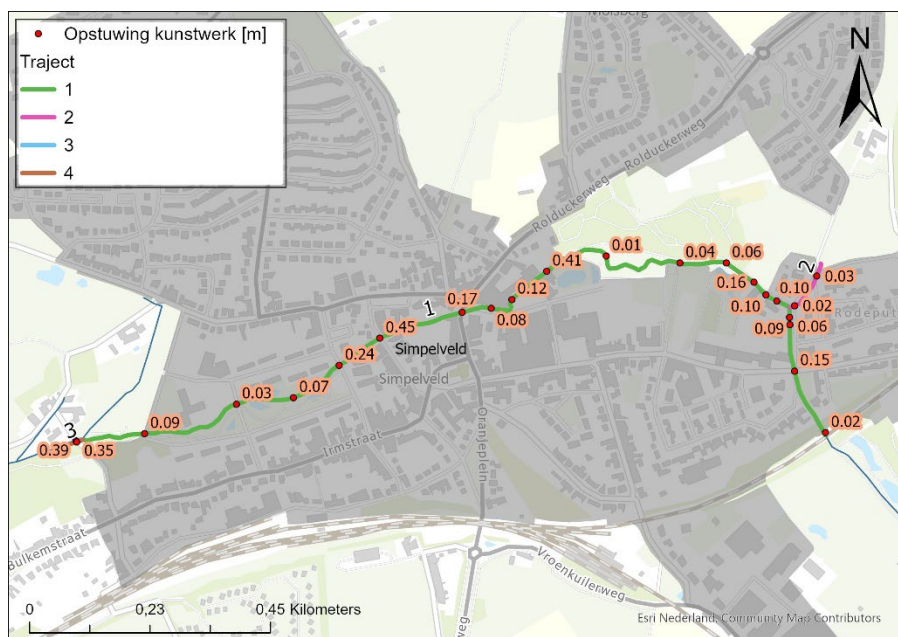


Figuur 6-12: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Eys met trajectnummers.

Tabel 6.13: Opstuwing stedelijke kern Eys.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waterniveauverhang [m/km]	Bodemverschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	2,01	14,43	7,16	14,30	7,10	1,49

6.2.13 Simpelveld



Figuur 6-13: Opstuwing van kunstwerken binnen stedelijke kern Simpelveld met trajectnummers.



Figuur 6-14: Opstuwing van kunstwerken binnen Simpelveld ingezoomd op traject 3 en 4.

Tabel 6.14: Opstuwing stedelijke kern Simpelveld.

Traject	Lengte [km]	Waterhoogte verschil [m]	Waterverhang [m/km]	Bodem verschil [m]	Bodemverhang [m/km]	Totaal opstuwing kunstwerken [m]
1	0,26	11,96	46,91	11,63	45,60	2,45
2	0,11	1,18	11,25	1,81	17,21	0,05
3	0,03	0,39	11,99	0,09	2,85	0,39
4	0,03	0,39	12,11	0,09	2,88	0,35

A1 Outlet controlled formule Gelok

ID	Q [m3/s]	Breedte duiker (b) [m]	Manning roughness (n) [s/m1/3]	Kritische waterhoogte (yc) [m]	Kritische bodemhelling (sc)	Bodemhelling duiker (sb)	Control conditie
D_13697	10.08	-	-	-	-	-	Ondergedompelde duiker H1>1,2*hduiker & h2>hduiker & h0>hduiker: Outlet control
D_12875	12.25	4.2	0.033	0.95	0.0178	0.0011	sb<sc: Outlet control
D_15520	12.35	4.2	0.033	0.96	0.0178	0.0011	sb<sc: Outlet control
D_14366	3.16	1.5	0.052	0.77	0.0736	0.0039	sb<sc: Outlet control
D_16414	1.75	2.25	0.037	0.39	0.0267	0.0051	sb<sc: Outlet control
B_10890	44.59	11.83	0.032	1.13	0.0121	0.0018	sb<sc: Outlet control
B_11086	31.96	9.95	0.032	1.02	0.0127	0.0078	sb<sc: Outlet control
B_10575	50.70	12.14	0.032	1.21	0.0119	0.0010	sb<sc: Outlet control
B_10893	4.71	5.77	0.032	0.41	0.0161	0.0013	sb<sc: Outlet control
B_10888	43.20	14.8	0.032	0.95	0.0119	0.0009	sb<sc: Outlet control
B_11809	2.50	3.971	0.032	0.34	0.0176	0.0068	sb<sc: Outlet control
B_10348	3.09	10.59	0.032	0.21	0.0178	0.0761	sb>sc: Inlet control *
B_10384	2.79	4.89	0.032	0.32	0.0172	0.0086	sb<sc: Outlet control
B_11284	31.68	8.06	0.032	1.16	0.0133	0.0017	sb<sc: Outlet control
B_10213	2.98	3.38	0.032	0.43	0.0179	0.0078	sb<sc: Outlet control

*De brug met ID B_10348 is inlet controlled. Deze brug wordt in de situatie van Q140 niet meegenomen in de berekening van opstuwing, omdat de waterhoogte de brug niet bereikt.

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{g \cdot b^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$s_c = \left(\frac{Q \cdot n}{b \cdot y_c \cdot R_{hc}^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$