

# 1 Inleiding

Voor het beoordelen op het voorkomen van piping onder een dijklichaam zijn verschillende methoden bekend.

In de Nederlandse situatie is de methode van Sellmeijer gebruikelijk. Voorliggend document gaat in op de verschillende onderdelen van deze methodiek en biedt een pythonscript om deze methodiek zelf toe te passen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de TIM modules van Mark Bakker om, gegeven de opbouw van een ondergrond (op basis van sonderingen), met behulp van omgevingsvariabelen, een snel, indicatief, idee te krijgen van de invloed van de Sellmeijer formule in deze ondergrond.

In 1988 is J.B. Sellmeijer gepromoveerd op het kwantificeren van piping. In dit proefschrift wordt een (deels empirische) formule beschreven op basis waarvan een voorspelling kan worden gemaakt over de lengte van een piping-kanaal onder een dijklichaam gegeven een veelheid aan omgevingsparameters.

*NB:*

*Dit document is een inventariserend groeidocument, het is niet bedoeld als verklarend artikel.*

*Inzichten kunnen foutief of overdreven zijn.*

*Het document is met name bedoeld als rekenvoorbeeld van Sellmeijer in combinatie met TIM.*

*Dit document is vooral bedoeld voor eigen gebruik om de methodiek en achterliggende onderdelen ook in de toekomst voor mezelf begrijpelijk te houden.*

.

## 2 Sellmeijer

### 2.1 Formule

De formule van Sellmeijer heeft verschillende verschijningsvormen, afhankelijk van waar de diverse factoren in de te onderscheiden deelformules zijn opgenomen. In paragraaf 1.1.1 is de schrijfwijze van Deltares opgenomen, in paragraaf 1.1.2 de schrijfwijze van Acacia, in paragraaf 1.1.3 de versie van de schematiseringshandleiding en in paragraaf 1.1.4. de versie van Joost Pol.

De basisvorm is overal in principe gelijk:

- Een weerstandsfactor die de korrels die het moment beschrijft waar door een externe druk de korrels in een buis (pipe) net gaan bewegen.
- Een geometriefactor waarin de korrelgrootte van het zand en de doorlatendheid van de watervoerende laag is opgenomen
- Een schaafactor die de 'sprong' van de schaal van de korreltjes (<1 mm) zelf naar de werkelijkheid (hectometerschaal) vertegenwoordigt
- De afstand van het intredepunt naar het uittredepunt (lengte in m)

Op basis hiervan wordt de  $H_c$ , het kritiek verval waarbij de korrels gaan bewegen, berekend. Als het kritiek verval toeneemt betekent dit dat er meer weerstand geboden kan worden tegen korrelverplaatsing, bij een klein kritiek verval is er dus niet veel extra spanningsverschil noodzakelijk om de korrelverplaatsing op gang te brengen.

In deze Sellmeijer formule is het heersende spanningsverschil in het grondwater dus geen onderdeel. Voor het bepalen van de mogelijke pipelengte wordt gebruik gemaakt van en door Deltares ontwikkeld algoritme. Hierin komt het drukverschil tussen het intredepunt en het uittredepunt ( $\delta H$ ) tevoorschijn. Deze drukken zijn met behulp van de TIM<sup>1</sup> module per diepte-interval berekend en vervolgens gebruikt om per diepte interval de pipelengte te berekenen. Hiervan zijn in hoofdstuk 4 en 5 voorbeelden opgenomen.

---

<sup>1</sup> [GitHub - mbakker7/timml: An analytic element model for steady multi-layer flow](https://github.com/mbakker7/timml)

### 2.1.1 Deltares

$$\frac{H_c}{L} = F_{resistance} F_{scale} F_{geometry}$$

$$F_{resistance} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \left( \frac{RD}{RD_m} \right)^{0,35}$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left( \frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4}$$

$$F_{geometry}^{MSeep} = F(G)^{standarddike} = 0,91 \cdot \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} + 0,04} \left( \frac{D}{L} \right)^{-1}$$

waarin:

$\Delta H_c$	kritieke verval over de waterkering [m]
$\gamma'_p$	(schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water [kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	volumegewicht van water [kN/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	rolweerstandshoek van de zandkorrels [°]
$\eta$	coëfficiënt van White [-]
$\kappa$	intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m <sup>2</sup> ]
$d_{70}$	70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]
$d_{70m}$	gemiddelde $d_{70}$ in de kleine schaalproeven (2,08 E-4m)
$D$	dikte van de zandlaag [m]
$L$	lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]
$RD$	relatieve dichtheid [-]
$RD_m$	gemiddelde relatieve dichtheid in de kleine schaalproeven (0,725)

In deze benadering zijn er twee factoren toegevoegd t.o.v. Acacia, te weten de  $D_{70m}$  en de  $RD/RD_m$  factor. Daarnaast is in de geometrie factor een waarde van 0.91 toegevoegd.

## 2.1.2 Acacia

$$\Delta H_c = \frac{G+R+S+F}{L}$$

Vergelijking 1

Waarin:

$$G = \frac{D D^{0,28}}{L} - 1$$

$$R = \frac{\gamma_p'}{\gamma_w} * \tan \vartheta$$

$$S = \eta \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}}$$

$$F = 0,68 - 0,1 \ln(S)$$

$$\kappa = \frac{v}{g} k = 1,35 * 10^{-7} k$$

Het toetsingscriterium dat wordt gebruikt is als volgt:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Vergelijking 2

D	=	dikte watervoerende laag [m]	
$\Delta H_c$	=	toegestaan peilverschil [m]	
$\Delta H$	=	Werkelijk peilverschil [m]	
$\gamma_p'$	=	volume gewicht korrels [kN/m <sup>3</sup> ]	17 [NORM]
$\gamma_w$	=	volume gewicht water [kN/m <sup>3</sup> ]	10 [NORM]
$\vartheta$	=	rolweerstandhoek van de zandkorrels [°]	41 [NORM]
$\eta$	=	sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White) [-]	0,25 [NORM]
$d_{70}$	=	70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]	
$\kappa$	=	intrinsieke doorlatendheid [m <sup>2</sup> ]	
L	=	minimale kwelweglengte [m]	
k	=	doorlatendheid zand in watervoerende laag [m/s]	
$\gamma$	=	veiligheidsfactor [-]	1,2 [NORM]
d	=	lengte verticale kwelweg / dikte weerstandsbiedende laag polder [m]	

In deze benadering ontbreekt de D70m en wordt de schaafactor door een formule (F) vervangen.

### 2.1.3 Schematiseringshandleiding

$$\frac{\Delta H_e}{L} = F_{\text{resistance}} F_{\text{scale}} F_{\text{geometry}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{resistance}} &= \eta \frac{\gamma_{\text{sub-particles}}}{\gamma_{\text{water}}} \tan \theta \\ F_{\text{scale}} &= \frac{d_{70,m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left( \frac{d_{70}}{d_{70,m}} \right)^{0,4}, \quad \kappa = \frac{v_{\text{water}}}{g} k \\ F_{\text{geometry}} &= 0,91 \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,3} + 0,04} \end{aligned} \quad (7)$$

Waarin:

$L$	Kwelweglengte van in- tot uittredepunt: $L = X_{\text{exit}} - X_{\text{entry}}$ [m].
$\gamma_{\text{sub-particles}}$	Volumegewicht van zandkorrels onder water (= 16,5) [kN/m <sup>3</sup> ].
$\eta$	Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (= 0,25) [-].
$d_{70}$	70-percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping-gevoelige laag [m].
$\kappa$	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m <sup>2</sup> ].
$k$	Darcy doorlatendheid [m/s].
$\nu$	Kinematische viscositeit van water (voor grondwater van 10° Celsius: 1,33·10 <sup>-6</sup> ) [m <sup>2</sup> /s].
$g$	Zwaartekrachtversnelling (= 9,81) [m/s <sup>2</sup> ].
$D$	Dikte van de zandlaag [m].
$d_{70,m}$	Referentie $d_{70}$ -waarde (= 2,08·10 <sup>-4</sup> ) [m].
$\theta$	Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel (= 37) [°].

In deze benadering ontbreekt de RD/RDm van de Deltares benadering. Wel is de referentie D70m behouden.

### 2.1.4 Pol

In december 2022 verschijnt het proefschrift van Joost Pol<sup>2</sup>. Hierin geeft hij de volgende, meer uitgebreide, versie van de Sellmeijer formule:

$$H_c = F_r \cdot F_s \cdot F_g \cdot L \quad (2.7)$$

$$F_r = \eta \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \tan \theta \cdot \left( \frac{D_r}{D_{r,m}} \right)^{0.35} \cdot \left( \frac{C_u}{C_{u,m}} \right)^{0.13} \cdot \left( \frac{KAS}{KAS_m} \right)^{-0.02} \quad (2.8)$$

$$F_s = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \cdot \left( \frac{d_{70,m}}{d_{70}} \right)^{0.6} \quad (2.9)$$

$$F_g = 0.91 \left( \frac{D}{L} \right)^{0.28 / [(D/L)^{2.8} - 1] + 0.04} \quad (2.10)$$

Hierin zijn ten opzichte van de bovenvermelde versies de factoren  $C_u$ ,  $C_{u,m}$ ,  $KAS$  en  $KAS_m$  opgenomen.

Hierin staat de  $C_u$  voor de uniformiteitscoëfficiënt, een indicatie van de korrelverdeling. De  $C_{u,m}$  is hierin een maatgevende waarde (1,81).  $KAS$  is een waarde voor de hoekigheid van de korrels,  $KAS_m$  een maatgevende waarde (0,498). Hiernaast is er nog een correctiewaarde voor de pakking (dichtheid) van de watervoerende laag aangenomen ( $D_{r,m}$ : 0,725). Opgemerkt wordt dat deze factoren uiteindelijk weinig bij lijken te dragen aan de lengte van de pipe.

---

<sup>2</sup> J.C. Pol, 2022, Time-dependent development of Backward Erosion Piping, TU Delft

## 2.1.5 Python

In onderstaand Python script snippet zijn de Pol-factoren opgenomen.

De uitleg en de impact van de respectievelijke onderdelen is opgenomen in hoofdstuk 3.

De formule voor de Lpipe is afkomstig van Deltares<sup>3</sup>

```
### Sellmeijer_Pol
n = 0.34 # whites constant [-]
vw = 1.5182e-6 # kinematic viscosity
g = 9.81 # gravity [m/s2]
ysp = 26.5-9.81 # vol weight sand korrels onder water
D70factor = 1.4e-4 # neem nu eens minimum in Hjulstrom=fijn zand wat als eerste uitstroomt

## weerstandsfactor komt rond 0.3
df['rho'] = np.where(df['Kg']==1, 38, 37) #schoon zand (well graded) heeft net wat meer weerstand
df['fr'] = n * (ysp / 9.81) * np.tan(np.radians(df['rho']))*(pow(df['Dr']/0.725,0.35))* (pow(df['Cu']/1.81,0.13))*(pow(df['KAS']/0.498,-0.02))

# Geometriefactor komt rond 1.1
ddl = diktesell / l_entry_exit
asell = pow(ddl, 2.8) - 1
b = 0.28 / asell + 0.04
df['fg'] = 0.91 * pow(ddl, b)
df['kms'] = df['k']/(24*60*60)
df['kappa'] = vw / g * df['kms']
df['d70'] = 0.96984815*df['kms'] + 0.00012985
df['csell'] = D70factor/ pow(df['kappa'] * l_entry_exit, 1/3)
df['dsell'] = df['d70']/D70factor

## Schaalfactor komt rond 0.2
df['fs'] = df['csell'] * pow(df['dsell'],0.6) # ipv 0.4

df['Hc'] = l_entry_exit * df['fr'] * df['fs'] * df['fg']

df['H'] = (df['in']-df['uit'])-0.3*dikte_dek

if diktesell > l_entry_exit:
    ratioLc_L = (-0.3984 * pow(1.0, 2.0) + 0.7979*(1.0) + 0.0707)
else:
    ratioLc_L = (-0.3984 * pow(diktesell / l_entry_exit, 2.0) + 0.7979*(diktesell / l_entry_exit) + 0.0707)
Lc = l_entry_exit*ratioLc_L

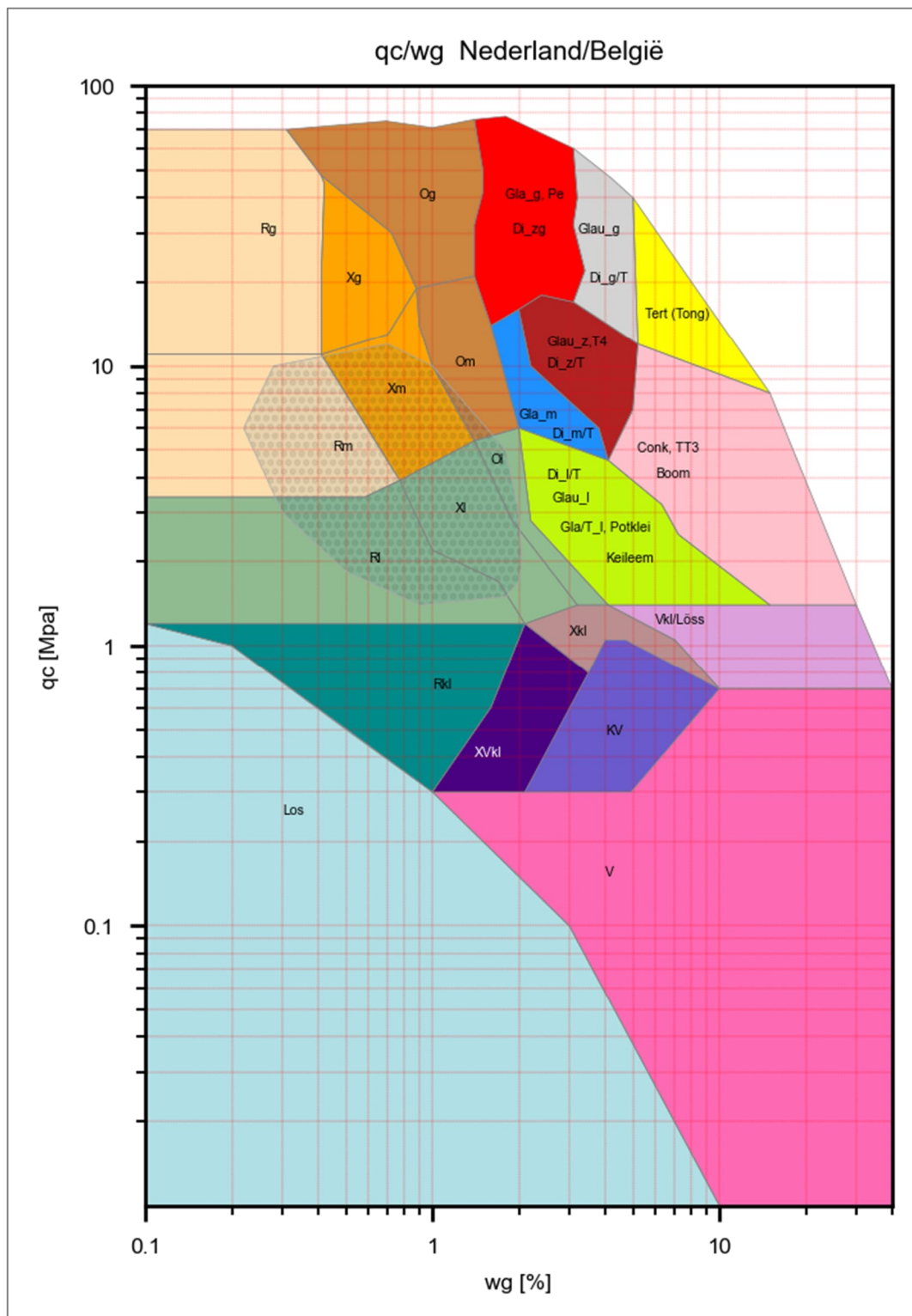
df['Lpipe'] = np.where(df['H']/df['Hc'] > 0,Lc*(164.535456 * pow(df['H']/ df['Hc'], 8.0) - 570.088738 * pow( df['H']/ df['Hc'], 7.0)+
797.636538 * pow(df['H']/ df['Hc'], 6.0) - 575.466390 * pow( df['H']/ df['Hc'], 5.0) + 227.705051 *
pow(df['H']/ df['Hc'], 4.0) - 48.9853799 * pow( df['H']/ df['Hc'], 3.0) + 5.96645859 *
pow(df['H']/ df['Hc'], 2.0) -3.67385412e-01 * (df['H']/ df['Hc']) + 0.00757329545), Lc*0.001)
```

Dit script wordt toegepast op een uit een sondering gegenereerde bodemopbouw. Of dit allemaal correct is weet ik niet, maar visueel lijkt het realistisch.

<sup>3</sup> Deltares, Kennis voor Keringen 2021:Achtergrondrapport Voorlanden, 11206817-010-GEO-0001, Versie 1.0, 23 februari 2022, definitief

### 2.1.6 Bodemtypes

Op basis van het vergelijken van circa 350.000 sonderingen (m.b.v. Python) uit Nederland en Vlaanderen is de volgende indeling naar bodemtype gemaakt op basis van de verhouding conusweerstand / wrijvingsgetal (figuur 2.1.6.a).



Figuur 2.1.6.a  $q_c/w_g$  diagram



Hierin is:



Het gestippelde vlak in (vooral) Rm, Xm, RI en XI is een deel van de grafiek waarbinnen verwekingsgevoeligheid een rol speelt.

Deze indeling wordt gehanteerd om een willekeurige sondering in te delen naar bodemtype waar op haar beurt weer parameters (hoekigheid, zettingsparameters etc.) aan worden gekoppeld.

Vervolgens kunnen de lagen in combinatie met de verschillende bodemparameters geautomatiseerd worden gebruikt in berekeningen.

## 3 Sellmeijer (de onderdelen)

### 3.1 Weerstandsfactor (formule 2.8 in Pol)

$$F_r = \eta \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \tan \theta \cdot \left( \frac{D_r}{D_{r,m}} \right)^{0.35} \cdot \left( \frac{C_u}{C_{u,m}} \right)^{0.13} \cdot \left( \frac{KAS}{KAS_m} \right)^{-0.02} \quad (2.8)$$

#### 3.1.1 Correctiewaarden

In de formules zoals deze door Pol worden gehanteerd staan een aantal correctiefactoren die voortkomen uit de praktijk. Dit betreft:

1.  $\rho_s, \rho_w$  Volumegewicht korrels en water (bij 10°)
2.  $D_r$  Pakkingsgraad van de matrix (tussen 0 en 1) wordt voorlopig op 0.7 gesteld.
3.  $D_{r,m}$  Maatgevende waarde pakingsgraad, 0.725
4.  $C_u$   $C_u$  voor de uniformiteitscoëfficiënt, een indicatie van de korrelverdeling.

Deze is binnen de WAM bepaald aan de hand van korrelgrootteverdelingen. Hierin is de verhouding D60/D10 bepaald. Deze is vergeleken met de k-waarde zoals deze uit de sonderingen volgt. De relatie hiertussen komt neer op  $df['Cu'] = 2.4806 * (pow(df['k'], -0.005))$   
Opgemerkt wordt dat deze relatie slecht is, meer vergelijkingsmateriaal is noodzakelijk. Deze factor is overigens niet erg van invloed op de uiteindelijke pipelengte

5.  $C_{u,m}$  Maatgevende waarde, 1.81.
6. KAS Hoekigheid

Deze is in de sondeergegevens, op basis van het vergelijken van in de sondering te onderscheiden bodemtypes met gegevens hierover uit literatuur en metingen, als volgt gedefinieerd:

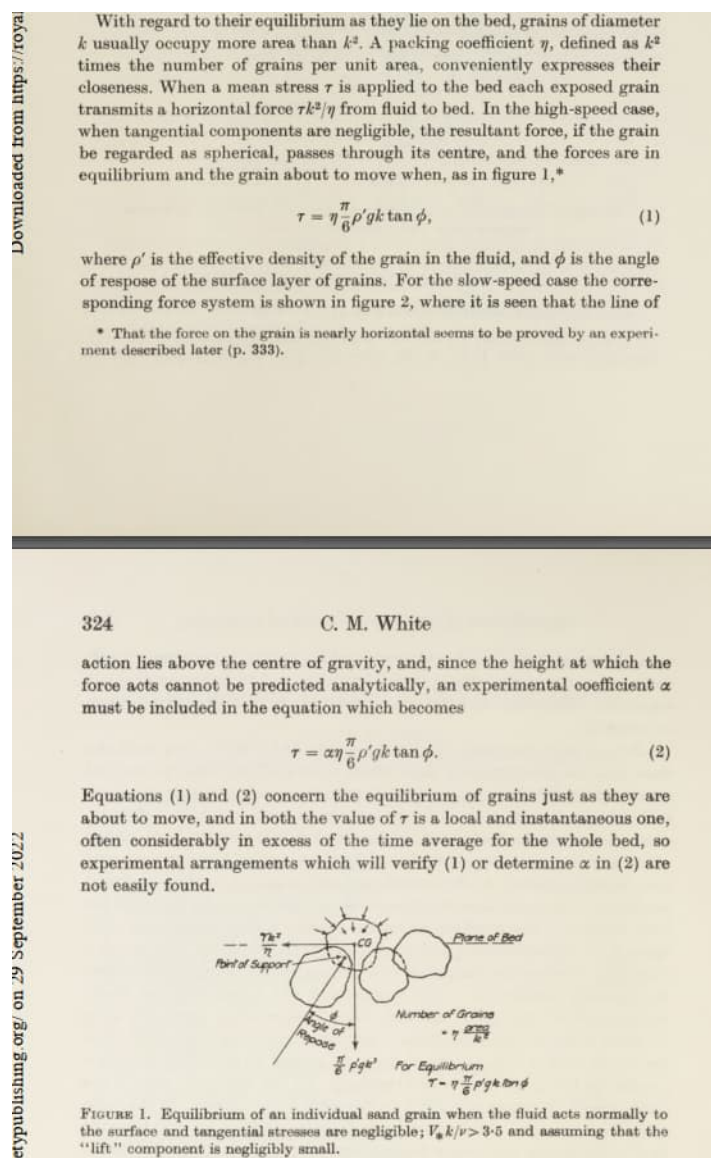
Bodemtype	KAS waarde
<i>Rg, Xg</i>	30
<i>Rm, Xm, Og</i>	50
<i>RI, XI, Om</i>	70
<i>Glal</i>	10
<i>Overige types</i>	90

7.  $KAS_m$  Maatgevende waarde, 0.498

### 3.1.2 White's constante

In 1940 publiceert C.M. White een artikel<sup>4</sup> over het evenwicht van korrels in de bedding van een stroom.

Hierin wordt aangevoerd dat korrels in een experimentele omgeving in beweging komen bij een bepaalde druk. De constante is in essentie een pakkingsconstante die maximaal 1 kan zijn.



In de experimentele opstelling wordt uitgegaan van de volgende data:

<sup>4</sup> C.M. White, The equilibrium of grains on the bed of a stream, Proc. R. Soc. Lond. A 1940.174:322-338

CONVERGING FLOW. MAIN STREAM: STEADY AND INVISCID. BOUNDARY LAYER: STEADY					
Exp. no.	Sand	$k$ mm.	Tan $\phi$ in water	$\tau$ dynes/sq. cm.	$\alpha\eta$
3	No. 1	0.122	1.0	3.56	0.39

Met als uiteindelijke conclusie:

CONCLUSION	
<p>In conclusion it can be emphasized that despite uncertainties, often as much as <math>\pm 25\%</math>, the experiments establish that, at low speeds, there is a wide range of <math>V_* k/\nu</math> in which, for any one size of grain, the stress to start movement is sensibly constant. Further, they establish that, other things being constant, the stress varies directly as the grain diameter. There is some evidence also that the stress varies directly as <math>\tan \phi</math>. Rounded sand grains subjected to a steady viscous drag begin to move when</p> $\tau = 0.18\rho' g k \tan \phi.$	

Hieruit is te berekenen dat de factor  $a$  (dit is een constante die in de Sellmeijer formule wordt toegepast) equivalent is aan 0.34. De door Sellmeijer aanbevolen waarde van 0.25 wordt in Selmeijers' proefschrift<sup>5</sup> geponeerd..

Mogelijk dat dit (0.25) een minder robuuste waarde is. Anderzijds hanteert Sellmeijer een rolweerstandwaarde van  $41^\circ$ , terwijl een waarde van  $37^\circ$ - $38^\circ$  meer overeen lijkt te komen met praktijkmetingen.

Deze parameters van Sellmeijer leiden tot een kortere pipelengte (ceteris paribus) dan een keuze voor een hogere White's constante.

<sup>5</sup> J.B. Sellmeijer, On the mechanism of piping under impervious structures, proefschrift, TU Delft, 1988

### 3.1.3 Rolweerstand

Naar de grootte van de rolweerstand (als hoek in graden) is veel onderzoek gedaan.

De USGS geeft de volgende indeling:

<disclaimer>

Some typical values of soil friction angle are given below for different USCS soil types at normally consolidated condition unless otherwise stated. These values should be used only as guideline for geotechnical problems; however, specific condition of each engineering problem often needs to be considered for an appropriate choice of geotechnical parameters.

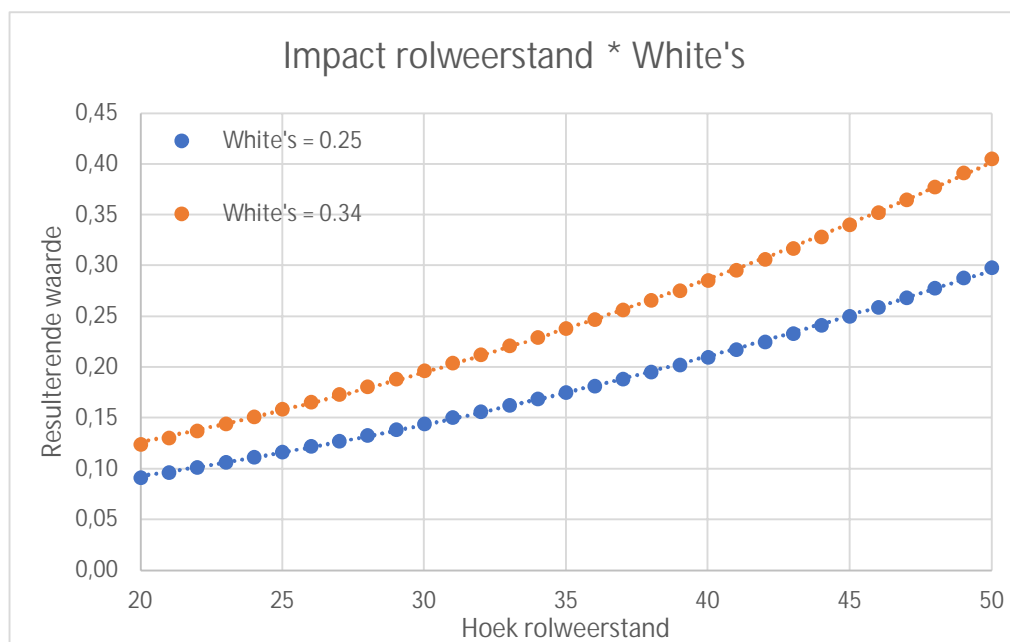
**Tabel USGS**

Description	USCS classificatie	Soil friction angle [°]		Specific value	Reference
		min	max		
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	33	40		[1],[2],
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	32	44		[1],
Sandy gravels - Loose	(GW, GP)			35	[3 cited in 6]
Sandy gravels - Dense	(GW, GP)			50	[3 cited in 6]
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	30	40		[1],
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	28	35		[1],
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	33	43		[1],
Well-graded clean sand, gravelly sands - Compacted	SW	-	-	38	[3 cited in 6]
Well-graded sand, angular grains - Loose	(SW)			33	[3 cited in 6]
Well-graded sand, angular grains - Dense	(SW)			45	[3 cited in 6]
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	30	39		[1], [2],
Poorly-graded clean sand - Compacted	SP	-	-	37	[3 cited in 6]
Uniform sand, round grains - Loose	(SP)			27	[3 cited in 6]
Uniform sand, round grains - Dense	(SP)			34	[3 cited in 6]
Sand	SW, SP	37	38		[7],
Loose sand	(SW, SP)	29	30		[5 cited in 6]
Medium sand	(SW, SP)	30	36		[5 cited in 6]
Dense sand	(SW, SP)	36	41		[5 cited in 6]
Silty sands	SM	32	35		[1],
Silty clays, sand-silt mix - Compacted	SM	-	-	34	[3 cited in 6]
Silty sand - Loose	SM	27	33		[3 cited in 6]
Silty sand - Dense	SM	30	34		[3 cited in 6]
Clayey sands	SC	30	40		[1],
Calley sands, sandy-clay mix - compacted	SC			31	[3 cited in 6]
Loamy sand, sandy clay Loam	SM, SC	31	34		[7],
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	27	41		[1],
Inorganic silt - Loose	ML	27	30		[3 cited in 6]
Inorganic silt - Dense	ML	30	35		[3 cited in 6]
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	27	35		[1],
Clays of low plasticity - compacted	CL			28	[3 cited in 6]
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	22	32		[1],
Inorganic silts of high plasticity	MH	23	33		[1],
Clayey silts - compacted	MH			25	[3 cited in 6]
Silts and clayey silts - compacted	ML			32	[3 cited in 6]
Inorganic clays of high plasticity	CH	17	31		[1],
Clays of high plasticity - compacted	CH			19	[3 cited in 6]
Organic clays of high plasticity	OH	17	35		[1],
Loam	ML, OL, MH, OH	28	32		[7],
Silt Loam	ML, OL, MH, OH	25	32		[7],
Clay Loam, Silty Clay Loam	ML, OL, CL, MH, OH, CH	18	32		[7],
Silty clay	OL, CL, OH, CH	18	32		[7],
Clay	CL, CH, OH, OL	18	28		[7],
Peat and other highly organic soils	Pt	0	10		[2],

Referenties in deze tabel:

1. Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers
2. JON W. KOLOSKI, SIGMUND D. SCHWARZ, and DONALD W. TUBBS, Geotechnical Properties of Geologic Materials, Engineering Geology in Washington, Volume 1, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78, 1989, Link
3. Carter, M. and Bentley, S. (1991). Correlations of soil properties. Penetech Press Publishers, London.
4. Meyerhof, G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. J Soils Mechanics and Foundation Division ASCE, 82(SM1).
5. Peck, R., Hanson, W., and Thornburn, T. (1974). Foundation Engineering Handbook. Wiley, London.
6. Obrzud R. & Truty, A. THE HARDENING SOIL MODEL - A PRACTICAL GUIDEBOOK Z Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012
7. Minnesota Department of Transportation, Pavement Design, 2007

De keuze voor 37° (voor slecht gegraadeerd zand) of 38° (goed gegraadeerd zand) is dus op zich al en conservatieve. De keuze voor 41° (Sellmeijer) is op basis van deze tabel een mogelijk te conservatieve. Met nader onderzoek naar deze waarde kan de pipelengte korter worden berekend. De invloed van deze twee parameters op de pipelengte voor normale zandige ondergrond ligt tussen 0,13 en 0,30, dus een significante waarde. In figuur 3.1.2.a is de impact van deze parameters op de lengte van de pipe weergegeven. Hierin wordt duidelijk gemaakt dat de keuze voor een hogere White's constante bij elke waarde voor de rolweerstand leidt tot een hogere gezamenlijke waarde in de formule en daarmee tot een langere berekende pipelengte.



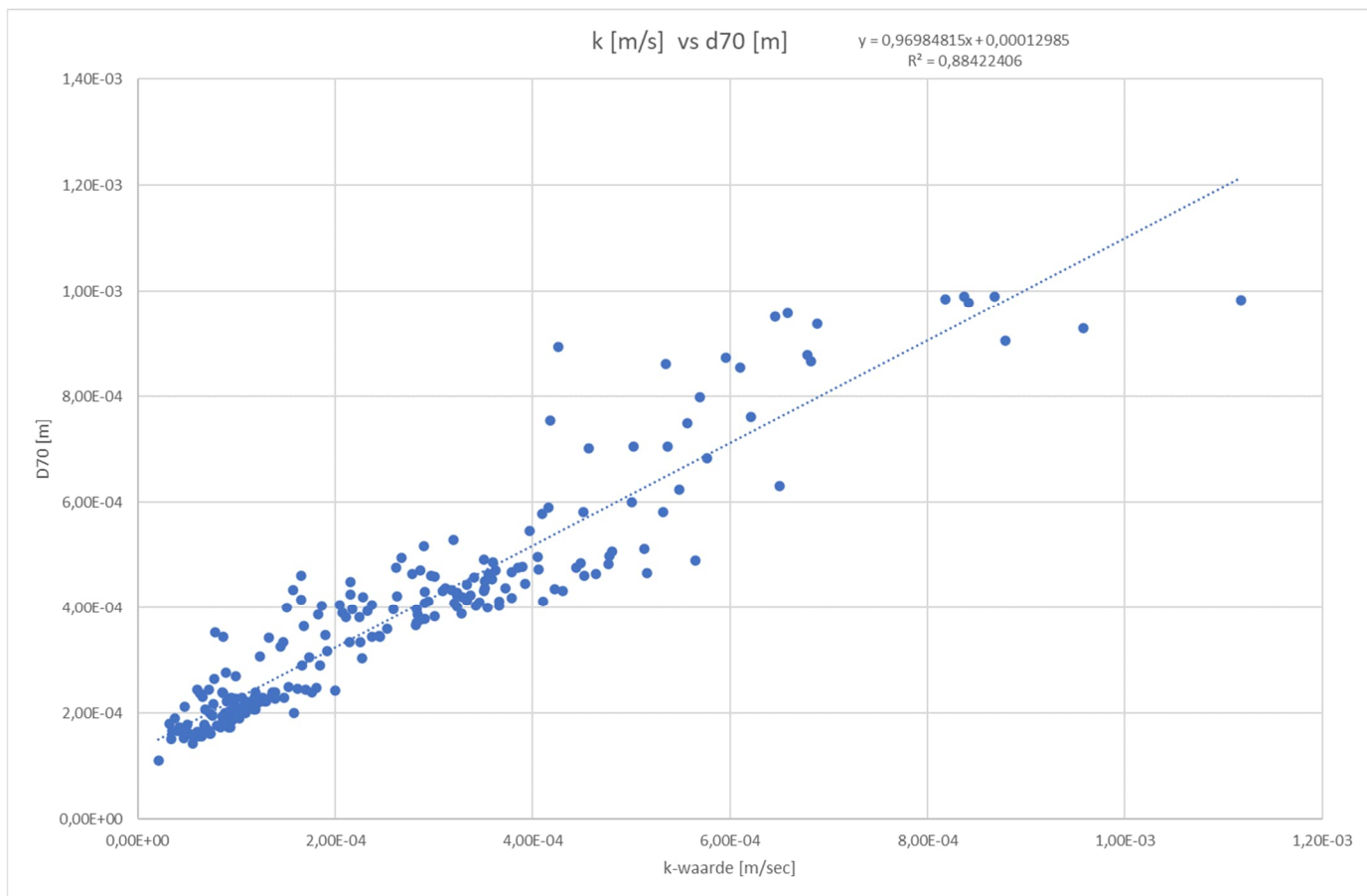
Figuur 3.1.2.a Invloed White en rolweerstand op pipelengte

## 3.2 Schaalfactor (formule 2.9 in Pol)

$$F_s = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \cdot \left( \frac{d_{70,m}}{d_{70}} \right)^{0.6} \quad (2.9)$$

### 3.2.1 D70

Deze is berekend aan de hand van in laboratorium bepaalde korrelgrootteanalyses (KGA) in het WAM (riviergebiet bij Wijk bij Duurstede-Amerongen) gebied. In vergelijking met de uit sonderingen berekende k-waarden voor het binnen de KGA onderzochte traject bij de meest dichtbij staande sonderingen is het volgende verband gevonden:



Figuur 3.2.1.a Verband bij de WAM tussen k-waarde en D70

Het hierin berekende verband is gebruikt om per laag in de sonderingen een benadering te maken van de (te verwachten) D70-waarde.

### 3.2.2 D70m

De D70m is een korrelgrootte correctiefactor die voortvloeit uit kleinschalige praktijkproeven. Ze is vastgesteld op een waarde van  $208\mu$  ( $2.08 \cdot 10^{-4}$  [m]) op basis van laboratoriumomstandigheden.

Deze waarde is van invloed op de berekening van de pipelengte. Bij een factor 2 grotere D70m in onderstaand rekenvoorbeeld ophoging neemt de pipelengte af tot 1.4 meter.

Bij een factor 2 lagere D70m neemt de pipelengte toe

Dit lijkt conform het uitgangspunt dat in grof materiaal piping minder actief is.

#### DP030

Toelaatbare kwelweglengte	162.0 [m]
Maximale pipelengte	1.4 [m]
Rivierwaterstand	9.6 [m NAP]
Hoogte maaiveld achterland	2.55 [m NAP]
Dikte WVP	41 [m]
Dikte deklaag	0.3 [m]
Toelaatbaar verval (Hc)	20.61 [m]
Berekende Lc	40.0 [m]
D70 (max. pipinginterval)	317 [mu]

*Berekening D70m =  $416\mu$*

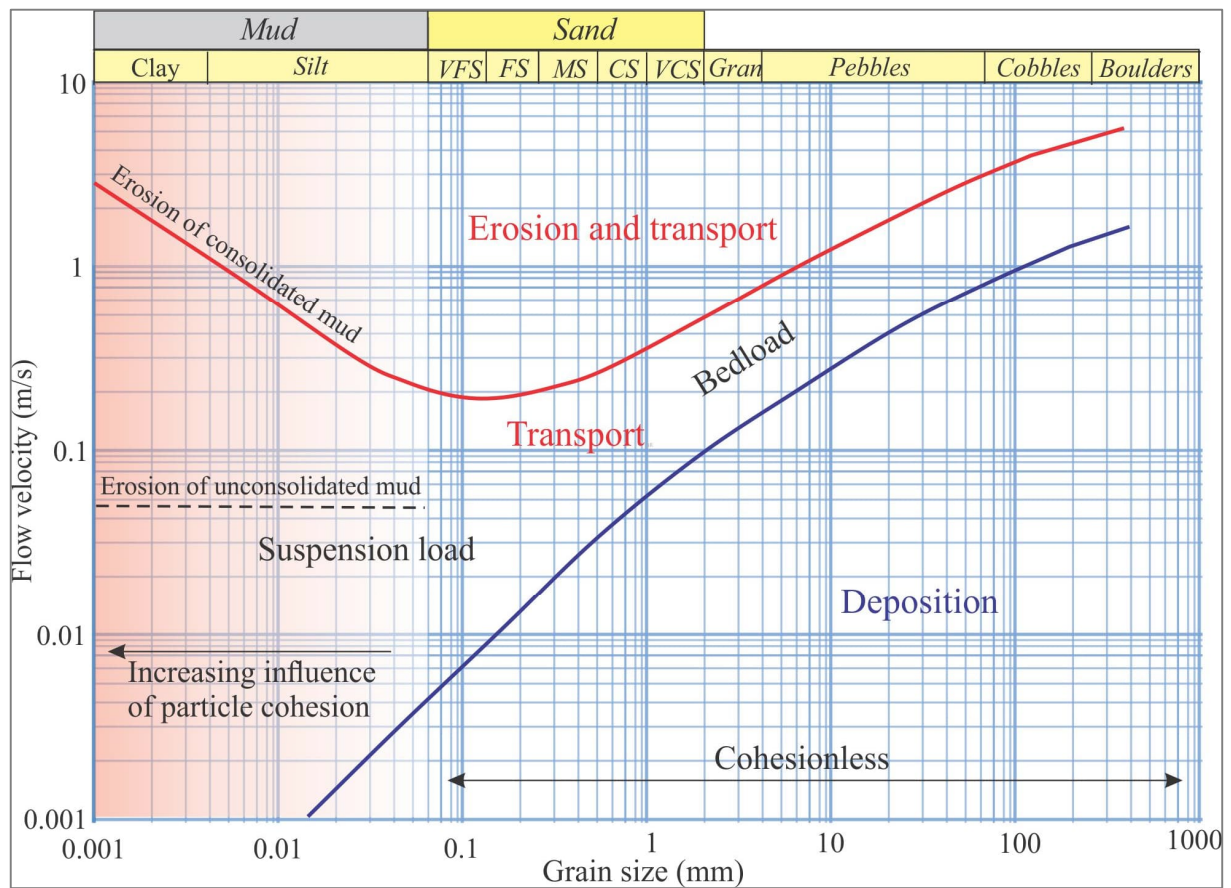
#### DP030

Toelaatbare kwelweglengte	162.0 [m]
Maximale pipelengte	10.3 [m]
Rivierwaterstand	9.6 [m NAP]
Hoogte maaiveld achterland	2.55 [m NAP]
Dikte WVP	41 [m]
Dikte deklaag	0.3 [m]
Toelaatbaar verval (Hc)	8.87 [m]
Berekende Lc	40.0 [m]
D70 (max. pipinginterval)	342 [mu]

*Berekening D70m =  $104\mu$*

Uit observaties bij daadwerkelijke pipes komt overigens naar voren dat er eerst fijnkorrelig materiaal uitstroomt voordat grover materiaal in beweging komt. Dit is conform het Hjulstrom diagram. Een waarde van  $140\mu$ , het minimum in het Hjulstrom diagram lijkt me een meer logische waarde voor de D70m waarde.



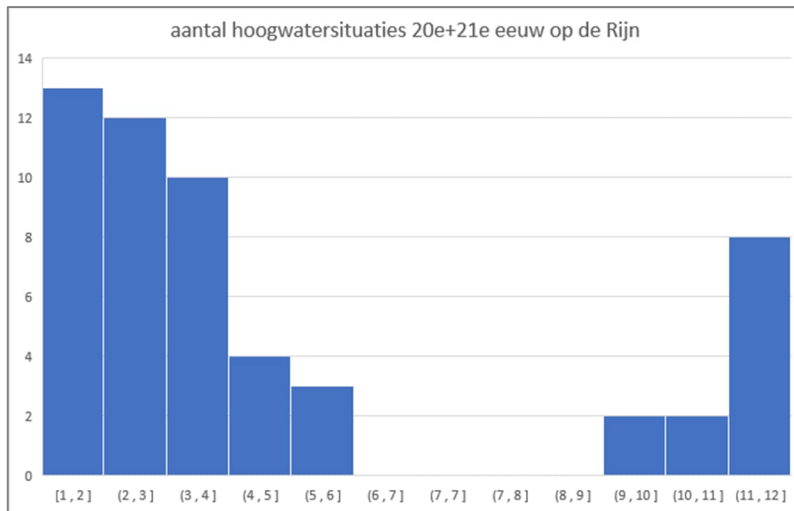


Figuur 3.2.2.a Hjulstrom diagram met minimum voor erosie bij circa 140  $\mu$

### 3.2.3 Dynamische viscositeit

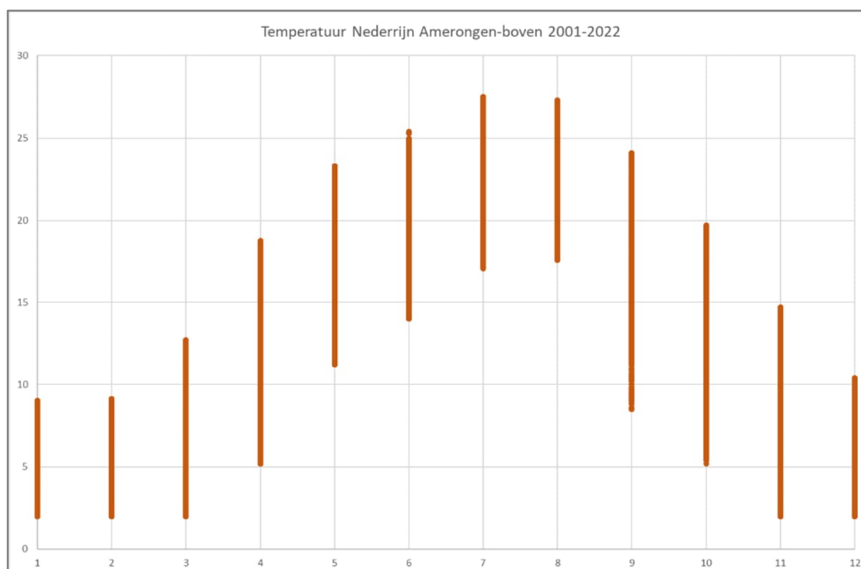
In de Sellmeijer formule wordt standaard gerekend met de kinematische viscositeit van water bij een temperatuur van 10° Celsius. Hierbij hoort een waarde van  $1.3081 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$

Nu wil het feit dat 70-80% van de hoogwaters op de Nederrijn (WAM gebied) voorkomen in de winter (maand 12-1-2):



Figuur 2.2.3.a Aantal voorkomens hoogwater op de Rijn

De temperatuur van de rivier wordt gerapporteerd door Rijkswaterstaat. Over de laatste 20 jaar is deze per maand als volgt

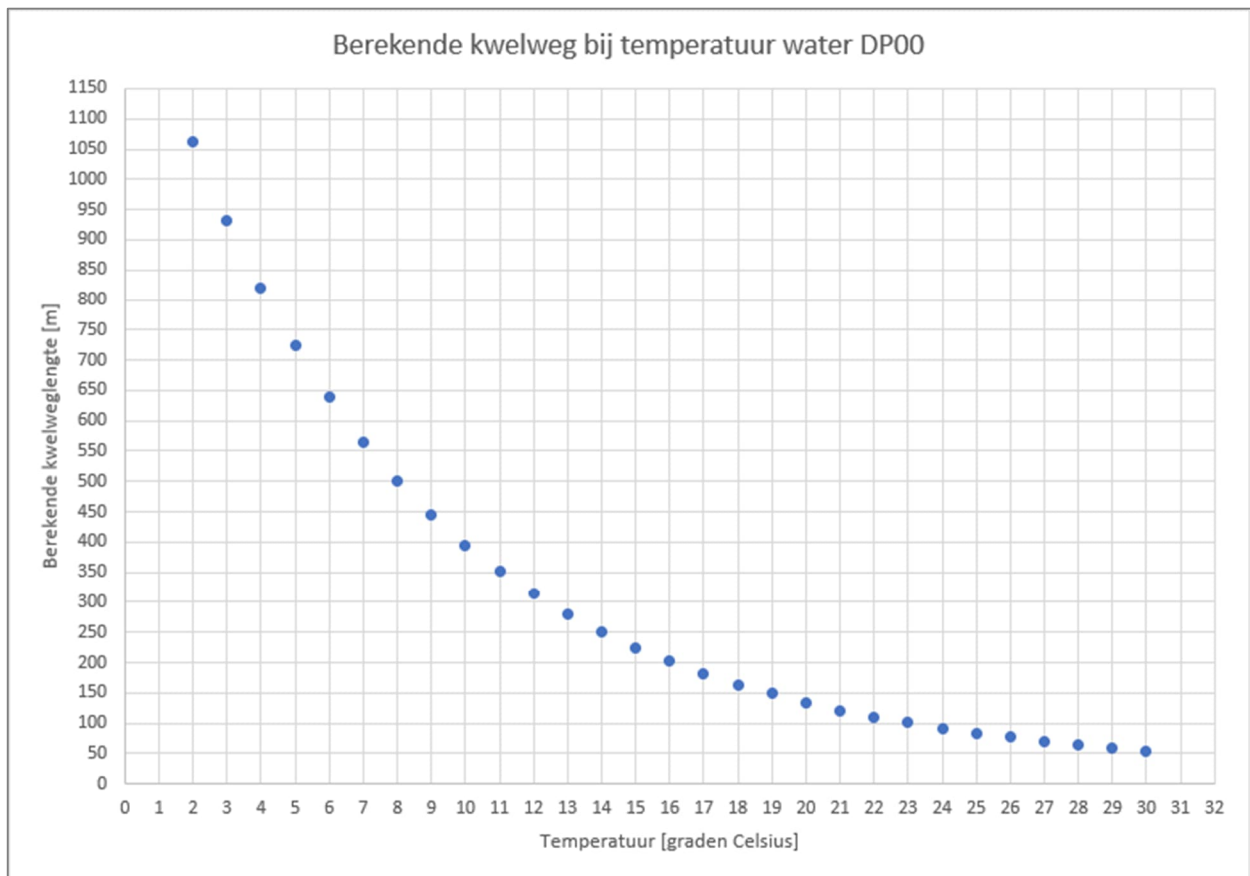


Figuur 2.2.3.b Temperatuur Rijnwater per maand

Dan zou het m.i. logischer zijn om te rekenen met een kinematische viscositeit van 5 graden Celsius. Hier hoort de waarde  $1.51217 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$  bij. Het water wat door de pipe stroomt is vooral rivierwater per slot van rekening.

Dit lijkt een klein verschil, maar in Sellmeijer lijkt dit een significante invloed te kunnen hebben van meer dan 20%-50% op de pipelengte (wordt langer bij kouder water).

In een voorbeeld is voor Dijkpaal 00 (Bij kasteel Amerongen) de invloed van de temperatuur op de pipelengte doorgerekend (figuur 2.2.3.c). Hieruit komt m.i. naar voren dat deze parameter niet te verwaarlozen is.



*Figuur 3.2.3.c Invloed temperatuur water op berekende pipelengte*

**3.2.3.1 Over dit aspect is aan de Helpdesk Water een vraag gesteld. Hieronder het antwoord met opmerkingen mijnerzijds**

**Antwoord**

Bedankt voor je vraag. Als wij het goed begrepen hebben wil je weten of je rekening moet houden met de seizoensvariatie in riviertemperatuur op je pipelengte berekeningen in D-Geo Flow. Het antwoord is nee, je hoeft geen rekening te houden met de seizoensvariatie in riviertemperatuur bij pipelengte berekeningen.

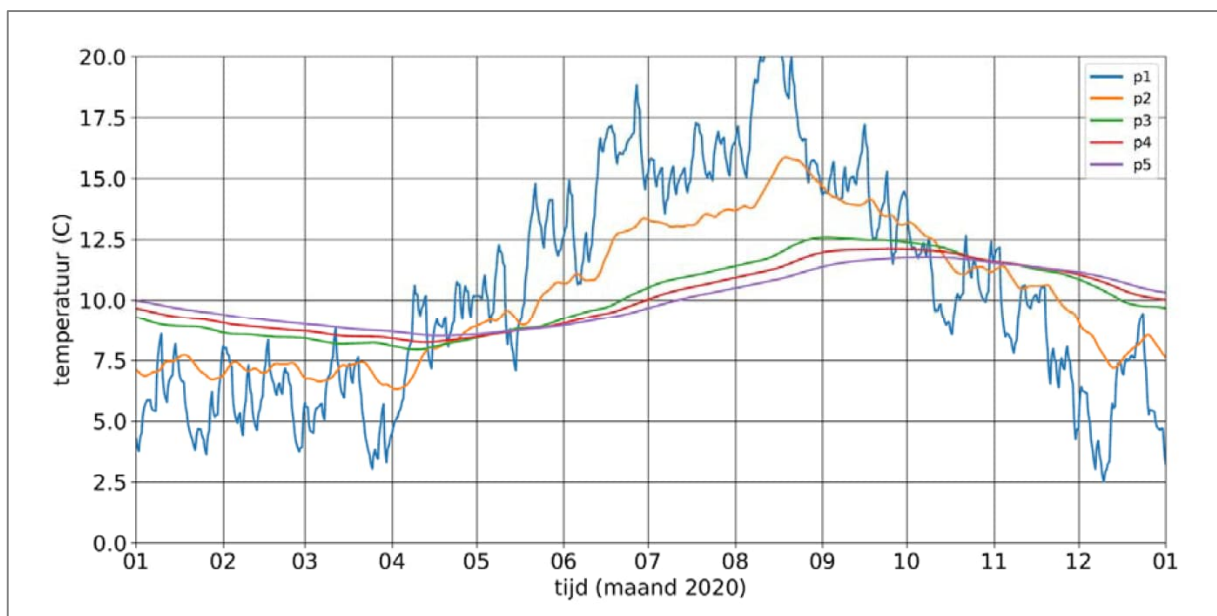
Redenen hiervoor zijn:

**1. Riviertemperatuur is anders dan grondwatertemperatuur**

Omdat het rivierwater heel langzaam infiltreert in de ondergrond is de grondwatertemperatuur minder gevoelig voor temperatuurvariaties. De verwachting is dat het grondwater (afhankelijk van de diepte) ongeveer constant is op 10 tot 12 graden gedurende het hele jaar.

Zie als voorbeeld de afbeelding hieronder van een collega die de grondwatertemperatuur heeft geplot gedurende een jaar op verschillende dieptes. Dit figuur komt echter niet uit een locatie naast een dijk of een rivier maar geeft wel een eerste indruk. Nog dieper dan P5 wordt de temperatuur constant verwacht op 10 tot 12 graden gedurende het hele jaar.

- ☐ P1 is mv -0,1 m
- ☐ P2 is mv -0,5 m
- ☐ P3 is mv -1,0 m
- ☐ P4 is mv -1,5 m
- ☐ P5 is mv -2,0 m



*DE: Dit is geen sterk argument, er is niet in een dijk bij hoogwater gemeten en het type ondergrond waarin deze meting is gedaan (lijkt me een weinig doorlatende kleilaag) is mogelijk niet representatief voor een zandlaag onder een dijklichaam*

## *2. Wij verwachten dat de pipelengte niet afhankelijk is van de grondwatertemperatuur.*

De grondwatertemperatuur beïnvloedt de Darcy doorlatendheid van een grondlaag. Hoe kouder hoe viskeuzer het water, en daardoor hoe minder doorlatend een grondlaag is. Deltares heeft in een studie onderzocht wat het effect is van variaties in de doorlatendheid van het watervoerend pakket (WVP) op de pipelengte, zie het rapport 'Onderzoek rapport Voorlanden – KvK2022'. Het antwoord is dat de pipelengte niet gevoelig is voor veranderingen in doorlatendheid van het watervoerend pakket (WVP). Dit komt doordat de pipelengte vooral afhankelijk is van de concentratie van stroming naar de pipe, dus van de stijghoogtecontourlijnen in een grondlaag. De doorlatendheid van het WVP beïnvloedt alleen het debiet naar de pipe, maar niet de stijghoogtecontourlijnen.

*DE: Dit lijkt te kloppen als we uitgaan van een generieke bulkdoorlatendheid voor het gehele WVP, maar hoe zit dat bij het includeren van gelaagdheid en anisotropie zoals dat in een TIM 3D berekening mogelijk is? Dan beïnvloedt de doorlatendheid wel degelijk de stijghoogtecontourlijnen*

## *3. Het kritieke verval is ook niet afhankelijk van variatie in grondwatertemperatuur*

Het is belangrijk om eerst het verschil tussen Darcy- en intrinsieke doorlatendheid goed te begrijpen. De Darcy doorlatendheid ( $k$ ) is afhankelijk van de grondwatertemperatuur maar de intrinsieke doorlatendheid ( $\kappa$  in  $m^2$ ) niet. Twee doorlatendheden van dezelfde grondmonster gemeten in het veld (bij een temperatuur van 10 graden) en in de lab (bij een temperatuur van 20 graden) zullen een andere Darcy doorlatendheid, maar dezelfde intrinsieke doorlatendheid hebben. Dit komt omdat de intrinsieke doorlatendheid gecorrigeerd is voor de grondwatertemperatuur middels de viscositeit ( $\mu$ )

$$k = \kappa * (\mu' / \mu) g$$

Het kritiek verval berekend met het Sellmeijer model is gebaseerd op de intrinsieke doorlatendheid en is daardoor ook niet afhankelijk van variatie in de grondwatertemperatuur in een zelfde grondlaag. Het is dus belangrijk bij het bepalen van de intrinsieke doorlatendheid om altijd het grondwatertemperatuur te gebruiken die aanwezig was tijdens de metingen van de doorlatendheid. In D-Geo Flow voert de gebruiker de Darcy doorlatendheid in. In D-Geo Flow wordt dan een vaste waarde voor de viscositeit (bij 10 graden Celsius) gehanteerd om deze waarde om te rekenen naar intrinsieke doorlatendheid. Als de gebruiker de waarde voor de doorlatendheid bij een andere temperatuur heeft bepaald, moet de gebruiker de doorlatendheid hiervoor corrigeren. Een verschil in intrinsieke doorlatendheid leidt uiteraard wel tot een verschil in kritiek verval.

*DE: Aandachtspunt, ik vraag me af of dit consequent wordt gedaan in de berekeningen*

#### 4. *Waarom is er dan wel een verschil berekend in pipelengte?*

De pipelengte berekeningen bij kritiek verval in D-Geo Flow zijn heel gevoelig voor de stapgrootte in verval die gebruikt wordt. Dit komt omdat de pipelengte harder groeit naarmate het kritieke verval bereikt wordt. Hierdoor kan een klein verschil in stapgrootte een grote verandering in pipelengte leiden. De verwachting is dat het verschil in pipelengte veroorzaakt is door een te grove stapgrootte. Wanneer beide berekeningen opnieuw worden gemaakt met een kleinere stapgrootte, van bijvoorbeeld 1 mm, wordt geen verschil in pipelengte meer verwacht.

DE: Dit lijkt me een mooi experiment in D-Geo Flow, niet voor dit document

#### 3.2.4 L

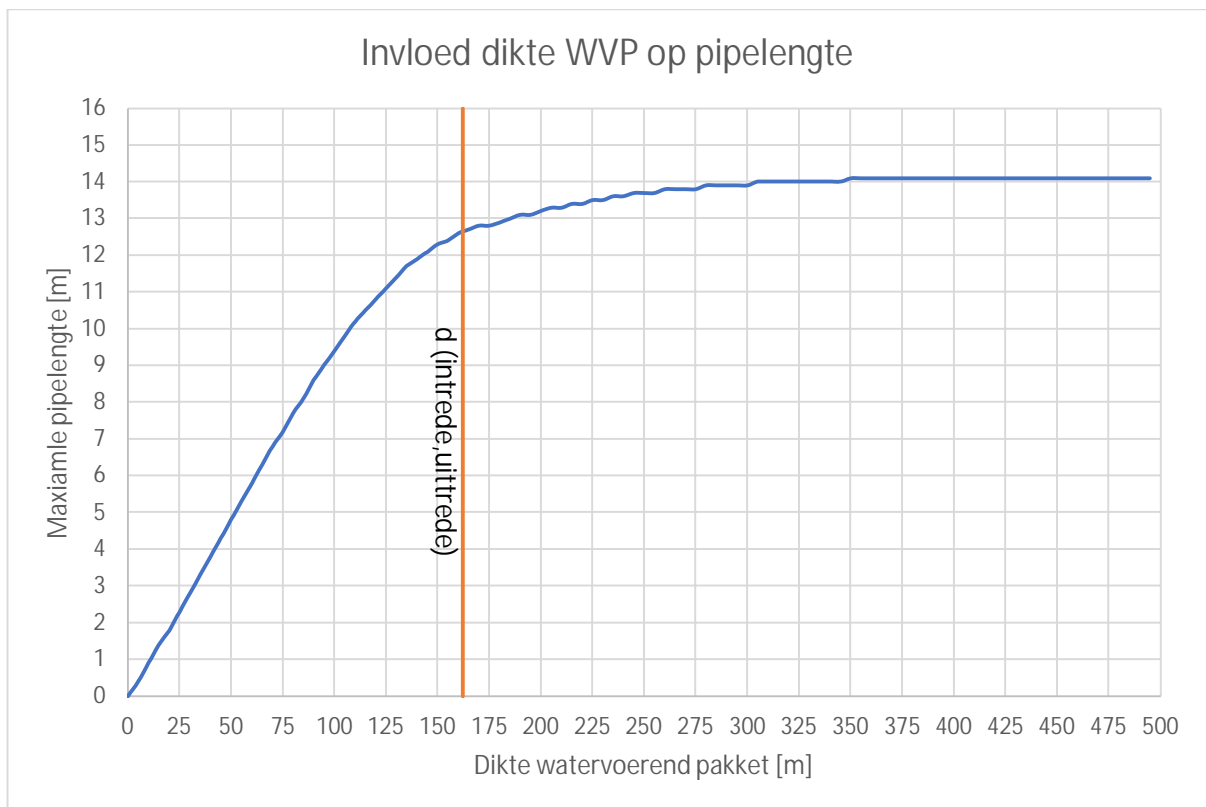
De afstand tussen intredepunt en uittredepunt is de waarde L. Dit is een handmatig in te geven waarde. Op locaties waar een pipe is ontstaan en waar het intredepunt duidelijk is kan de formule van Sellmeijer in theorie geijkt worden.

### 3.3 Geometriefactor (formule 2.10 uit Pol)

$$F_g = 0.91 \left( \frac{D}{L} \right)^{0.28 / [(D/L)^{2.8} - 1] + 0.04} \quad (2.10)$$

#### 3.3.1 D

De dikte van de watervoerende laag zit, zolang de dikte veel kleiner is dan de mogelijke pipelengte, ongeveer lineair in de formules. Bij dikte groter dan de mogelijke pipelengte neemt de invloed op de pipelengte af naar vrijwel 0. Indien voor een fictieve locatie de invloed van de L op de maximale pipelengte wordt doorgerekend (de afstand tussen intrede en uitrede is hier 162 meter, referentiepunt = DP00) wordt duidelijk dat bij beperkte dikte van het WVP de pipelengte lineair lijkt toe te nemen, maar deze invloed verdwijnt na een zekere dikte.



Figuur 3.3.1.a Invloed Dikte WVP op de pipelengte

### 3.4 Debieten

Bij het doorrekenen van de pipelengte met behulp van TIMML is het tevens mogelijk om het uitstromende debiet uit de te berekenen. Op basis van gepubliceerd onderzoek<sup>6</sup> kunnen deze berekende debieten vergeleken worden met de daadwerkelijk gemeten debieten. In onderstaande tabel 7 in dit onderzoek is een samenvatting opgenomen:

Tabel 7. Vergelijking tussen het debiet wat bepaald is op basis van de zeefkromme en de gemeten debieten

	Culemborg	Eck en Wiel	Lingewaal	Lingewaal
Datum monster	17-11-17	17-11-17	17-11-17	1977
Waterstand monstername [m t.o.v. NAP]	2,85	5,94	2,42	Geschat op 4,3 - 4,7
Grondwaterstijghoogte monstername [m t.o.v. NAP]	-	4,89	1,95	-
Diameter deeltje 80% [mm]	0,31	0,38	0,43	0,28
Diameter deeltje 90% [mm]	0,4	0,5	0,52	0,32
Diameter wel [cm]	10	20	5 - 10	30 - 35
Debiet 80% [m3/u]	1,6	9,8	0,78 - 3,13	12 - 16
Debiet 90% [m3/u]	2,7	16,9	1,1 - 4,6	15,6 - 21,3
Gemeten debiet [m3/u]	2,2	10 - 15	3,6	14,4 m3/u
Waterstand ten tijde van meting [m t.o.v. NAP]	2,38	6,1 - 6,15	2,37	Geschat op 4,3 - 4,7

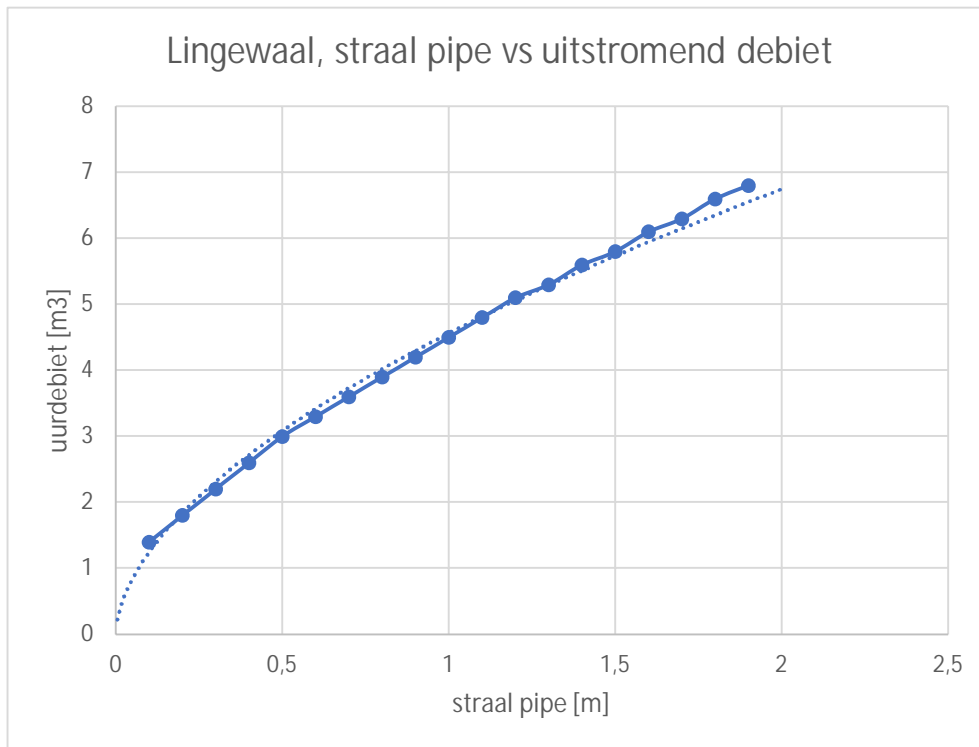
<sup>6</sup> Acacia, Rivierenland, POV-piping Wellen onderzoek, Eindrapport, 16 maart 2018



### 3.4.1 Diameter pipe

Voor de locatie Lingewaal is, op basis van de data van 17-11-2017, de invloed van de pipestraal bij het uittredepunt beschouwd.

Voor deze locatie is het volgende verband gevonden (figuur 3.4.a)



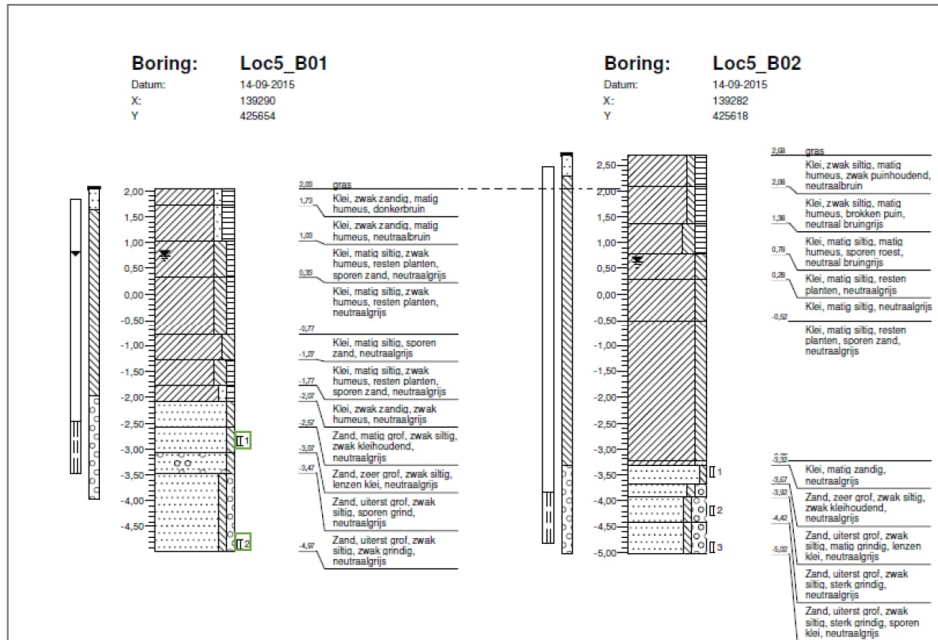
*Figuur 3.4.a      Indicatie invloed straal (= halve diameter!) op uitstromend debiet.*

Dit verband is logisch en verklaarbaar: des te groter de uitstroomopening, des te meer water eruit kan stromen.

In de Acacia onderzoeken lag de diameter tussen 0.05 en 0.4 meter. Door de uitstroom zal de pipe uitslijten en hierdoor meer gaan stromen. Op basis van deze berekening komt het gemeten debiet (bij een klein drukverschil tussen pipe en rivierstand) pas overeen bij een straal van 1 meter (= onrealistisch).

### 3.4.2 Diepte tot WVP

De diepte tot op een watervoerende laag op de locatie Lingewaal en de dikte van deze watervoerende laag zijn van wezenlijke invloed op het pipedebiet (verrassend genoeg nauwelijks op de pipelengte). Op basis van de beschikbare boringen in vergelijking met de sonderingen komt naar voren dat al op -2,0 [m NAP] de top van een grove zandlaag, lokaal met grind, aanwezig is (Loc5\_B1 in figuur 3.4.b). Naar het zuiden toe (Loc5-B02 en sondering CPT...163065, figuur 3.4.d) ligt de top van dit WVP dieper, te weten tussen -3 en -3,5 [m NAP].

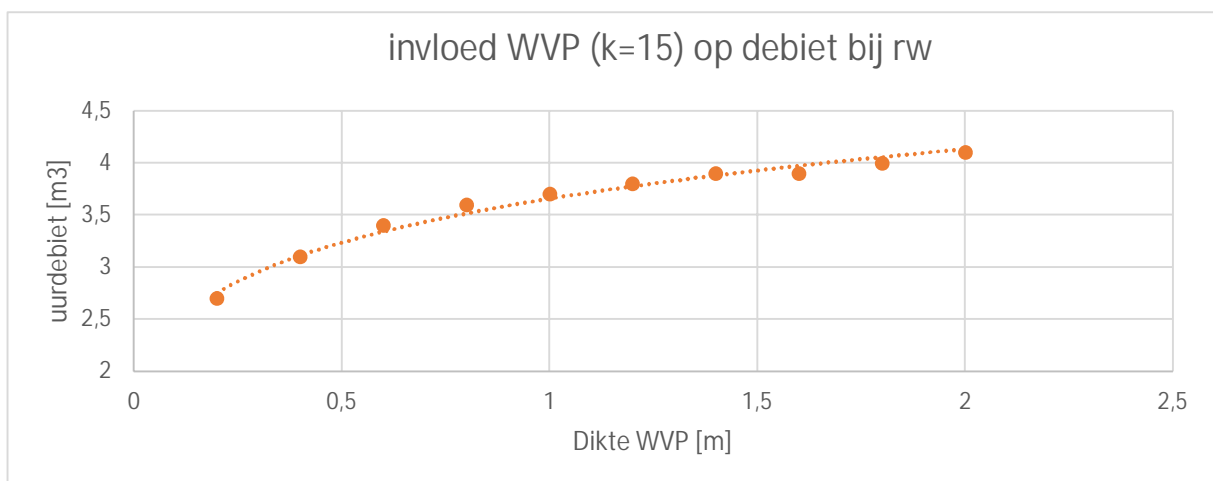


Figuur 3.4.b Boringen bij wel Lingewaal

Het aanwezig zijn van een WVP tussen -2,0 en -2,5 [m NAP] op de locatie van de wel is mogelijk

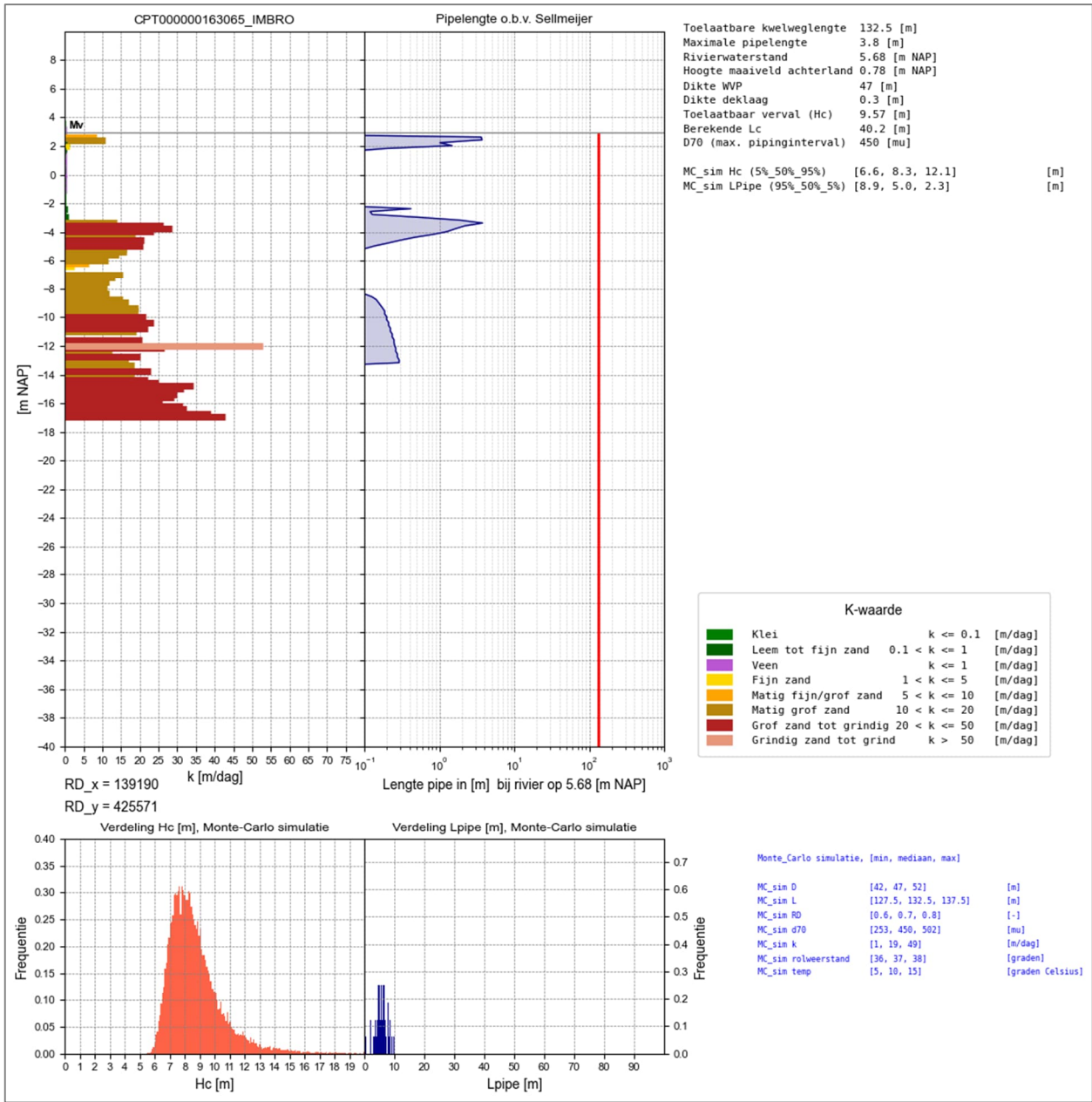
1. Verantwoordelijk voor het ontstaan van deze wel
2. Verantwoordelijk voor het debiet van deze wel.

Een relatie tussen de dikte van deze WVP met een top op -2,0 [m NAP] en het uitstromend debiet is opgenomen in figuur 3.4.c



Figuur 3.4.c Invloed dikte ondiep WVP op debiet

Dit soort opduikingen van zand in het achterland verdient in het kader van piping-risico aandacht. Hierbij is van belang dat deze opduiking (zandbaan) in open verbinding staat met het onderliggende dikke WVP.



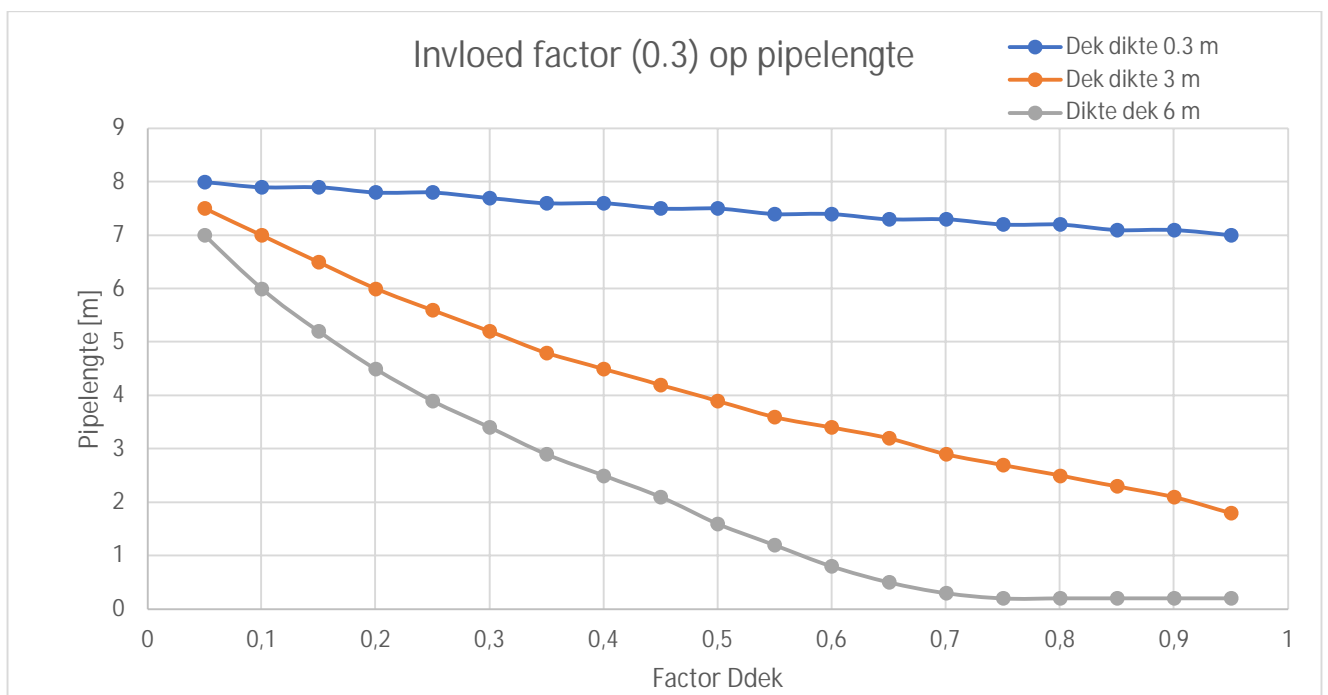
Figuur 3.4.d      Piping analyse Lingewaal

### 3.5 Deltares formule<sup>7</sup>

In de Deltares formule voor de berekening van de pipelengte ( $df['Lpipe']$ ) is een mitigerende factor op de  $df['H']$  (het verschil in stijghoogte tussen intrede en uittredepunt) ingebouwd met een waarde van  $0.3 \times$  de dikte van de deklaag. Dit vindt zijn oorsprong in het gegeven dat door de deklaag het water verticaal omhoog moet stromen en daarbij energie verliest (en daarmee een deel van het vermogen om korrels te transporteren).

Voor de piping bij DP38 in het WAM gebied is een vergelijk gemaakt voor het effect op de pipelengte voor verschillende (theoretische) factorwaarden,  $D_{dek}$ , en de dikte van de deklaag (figuur 3.5.a).

```
df['Hc'] = l_entry_exit * df['fr'] * df['fs'] * df['fg']
df['H'] = (df['in'] - df['uit']) - 0.3 * dikte_dek
if diktesell > l_entry_exit:
    ratioLc_L = (-0.3984 * pow(1.0, 2.0) + 0.7979 * (1.0) + 0.0707)
else:
    ratioLc_L = (-0.3984 * pow(diktesell / l_entry_exit, 2.0) + 0.7979 * (diktesell / l_entry_exit) + 0.0707)
Lc = l_entry_exit * ratioLc_L
df['Lpipe'] = np.where(df['H'] / df['Hc'] > 0, Lc * (164.535456 * pow(df['H'] / df['Hc'], 8.0) - 570.088738 * pow(df['H'] / df['Hc'], 7.0) +
    797.636538 * pow(df['H'] / df['Hc'], 6.0) - 575.466330 * pow(df['H'] / df['Hc'], 5.0) + 227.705051 *
    pow(df['H'] / df['Hc'], 4.0) - 48.9853799 * pow(df['H'] / df['Hc'], 3.0) + 5.96645859 *
    pow(df['H'] / df['Hc'], 2.0) - 3.67385412e-01 * (df['H'] / df['Hc']) + 0.00757329545), Lc * 0.001)
```



Figuur 3.5.a Invloed  $D_{dek}$  factor op pipelengte.

<sup>7</sup> Deltares, Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden, 11206817-010-GEO-0001, Versie 1.0, 23 februari 2022, definitief

## 4 Voorbeelden

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van voorbeelden van een aantal bekende zandmeevoerende wellen uit het verleden met behulp van de python modules TIMML (voor het bepalen van de ondergrondse drukverschillen per laag (vaak op basis van sonderingen 0.02 meter dik) tussen de locatie van de pipe en het aangenomen intredepunt) en de formule van Sellmeijer (paragraaf 1.1.5).

Opgemerkt wordt dat dit een theoretische benadering is, het is onbekend hoe een pipe zich in de ondergrond daadwerkelijk manifesteert.

De locaties zijn alle uit het rivierengebied (om een connectie te houden met de KGA zoals deze bij de WAM is aangetroffen) en zijn weergegeven in figuur 4.1.



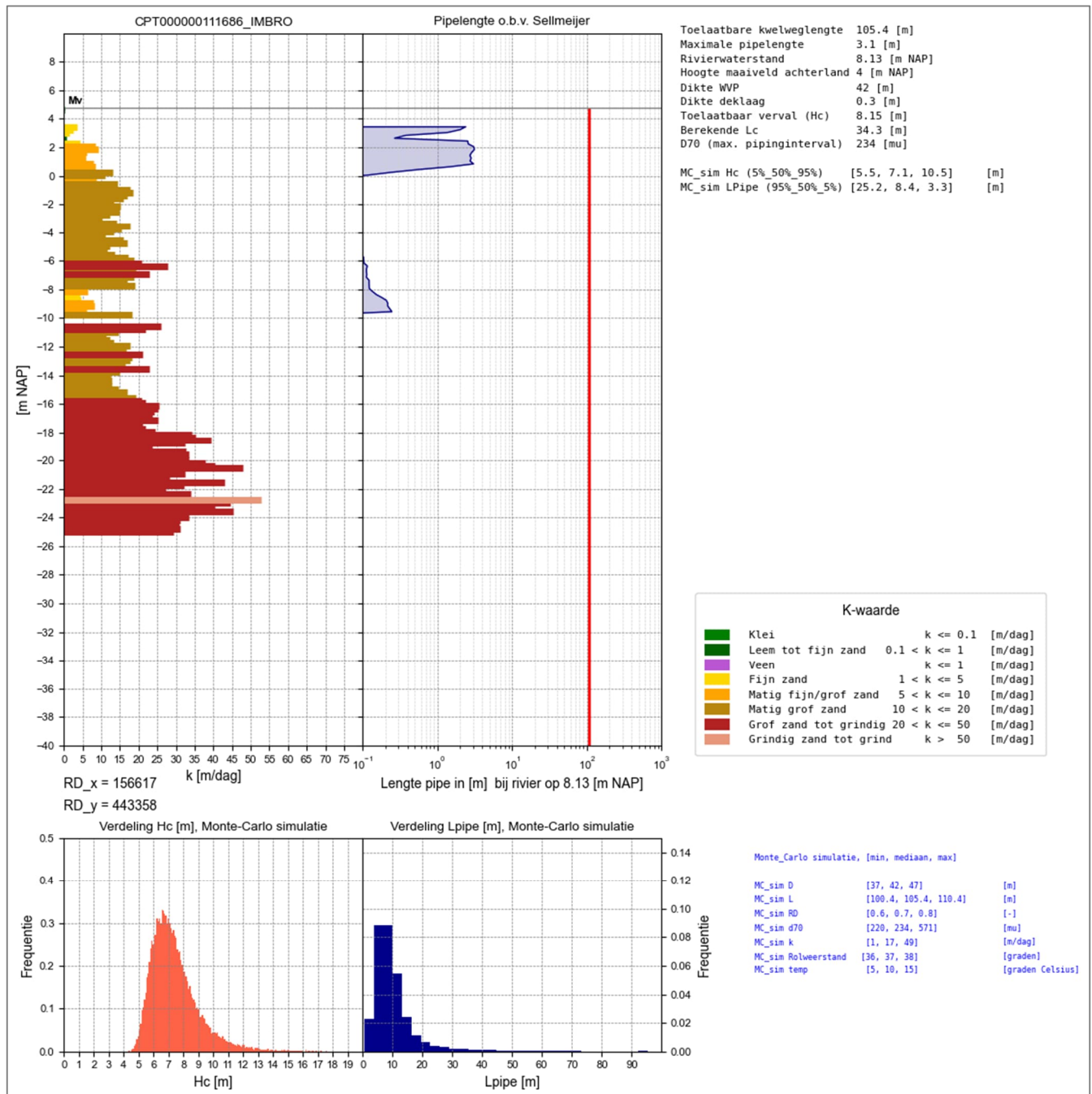
Figuur 4.1 Locatie voorbeelden



## 4.1 DP38 Amerongen

### 4.1.1 Algemeen

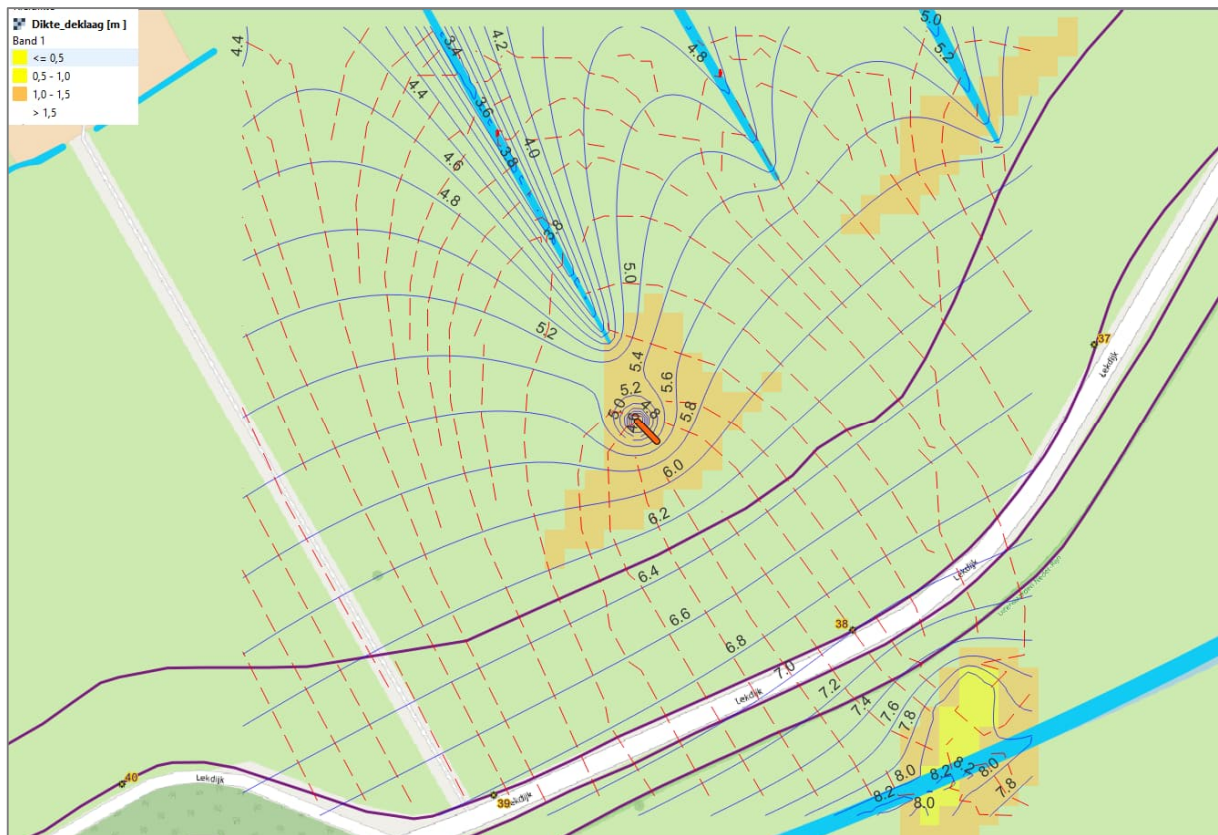
Bij het hoogwater eind januari 1995 is hier op 8 plekken in een (toen nog aanwezige serie kopsloten) een zandmeevoerende wel ontstaan. Hierbij is circa  $7 \text{ m}^3$  (fijn) zand door de pipes aangevoerd, dus circa  $0.9 \text{ m}^3/\text{wel}$ . De maximale waterstand in de Nederrijn bedroeg bij dit hoogwater  $+8.13 \text{ [m NAP]}$ . Op basis van de voor deze locatie gebruikte sondering (CPT000000111686\_IMBRO) zou bij deze rivierwaterstand een theoretische pipelengte mogelijk zijn van 3.1 meter (figuur 4.1.1.a).



Figuur 4.1.1.a Berekende theoretische pipelengte Amerongen

Net onder de deklaag, op circa +2 [m NAP] wordt de hoogste pipelengte berekend van 3.1 meter. Een hierbij horende doorsnede van de pipe (bij een uitgespoeld volume van 0.9 m<sup>3</sup>) is dan rekentechnisch 0.1 meter.

Met behulp van de TIM modules is voorts, gegeven de ligging van oppervlaktewater en de rivierstand, voor de laag net onder de deklaag een isohypsen en stromingspatroon bepaald. Deze is opgenomen in figuur 3.1.1.b.



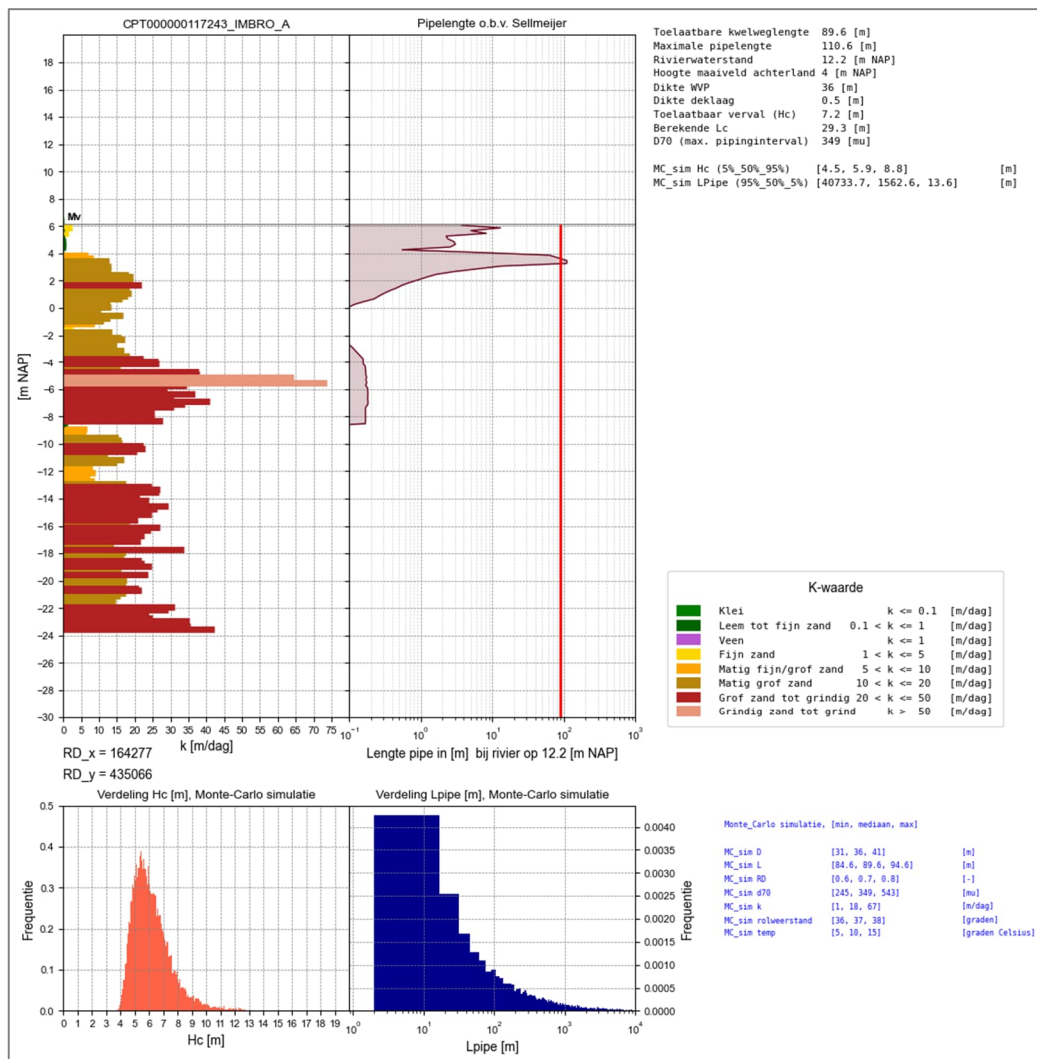
*Figuur 4.1.1.b isohypsen op +2 [m NAP] bij hoogwater op de Nederrijn van +8.13 [m NAP]. Pipe met oranje lijn, isohypsen [m NAP] in blauw, stromingspatroon rood gestreept.*

In bovenstaande figuur is de drainerende werking van het slootpatroon in het binnendijkse domein (door de dunne deklaag snijden de sloten in de top van het watervoerende pakket) goed zichtbaar. Een conclusie uit deze benadering zou kunnen zijn dat er weliswaar zand werd meegevoerd, maar dat de dijk bij deze rivierwaterstand eigenlijk niet werd ondergraven. De dikte van de deklaag (op basis van boringen en sonderingen) is (voor de dunnere deklaag) in de figuur met geel en oranje weergegeven. Met name de invloed van een ontbrekende deklaag aan de zuidoostelijke zijde is van invloed op de pipe. De kopsloten zijn na 1995 over een afstand van circa 20 meter gedempt.

In figuur 4.1.1.a is voorts een Monte-Carlo analyse op basis van de naast de onderste figuren variatie in factoren opgenomen. Hieruit komt naar voren dat zelfs de meest robuuste benadering ( $k_{\text{bulk}} = 49$  [m/dag]) een pipelengte berekent van 25.2 [m] bij een  $H_c$  van 5.5 [m], ruim onder de toegestane kwelweglengte van 150 [m].

## 4.2 Proeftuin IJzendoorn

Op deze locatie is veel gepubliceerd onderzoek gedaan naar het voorkomen en het ontstaan van de pipes <sup>8,9,10</sup> en de stabiliteit van dit dijkvak. In figuur 4.2.a is de uitkomst van de Sellmeijer berekening gekoppeld aan de laagopbouw weergegeven. Hierin is gerekend met een extreme rivierstand op +12.2 [m NAP]. Bij die waarde is er groeit de pipe onder de dijk door. Ook in de MC-simulatie is er een oververtegenwoordiging van doorgebroken pipes. In 83% van de simulaties berekende de kwelweglengte boven de 89.6 [m]



Figuur 4.2.a Interpretatie piping IJzendoorn

<sup>8</sup> Inpijn-Blokpoel, Pipingonderzoek dijkkring 43, Analyse pompproef proefvak 2, opdracht nr. 02P004885-adv-04, 18-05-2015

<sup>9</sup> Arcadis, Rivierenland, POV PIPING "PIPINGONDERZOEK DIJKRING 43, D70 EN KD BEPALING" ONDERZOEK NAAR DE TOEPASBAARHEID VAN DE REKENREGEL VAN SELLMEIJER 2011 ONDERSTEUND MET VELDWAARNEMINGEN, opdracht nr. 078250239:D, 06-06-2016

<sup>10</sup> Grontmij, Verbetering Waaldijken IJzendoorn-Tiel, augustus 1997



### 4.3 Proeftuin Tuil

Op deze locatie zijn in het verleden op een aantal plaatsen zand-meevoerende wellen aangetroffen tijdens hoogwater (bron: Stowa <sup>11</sup>)

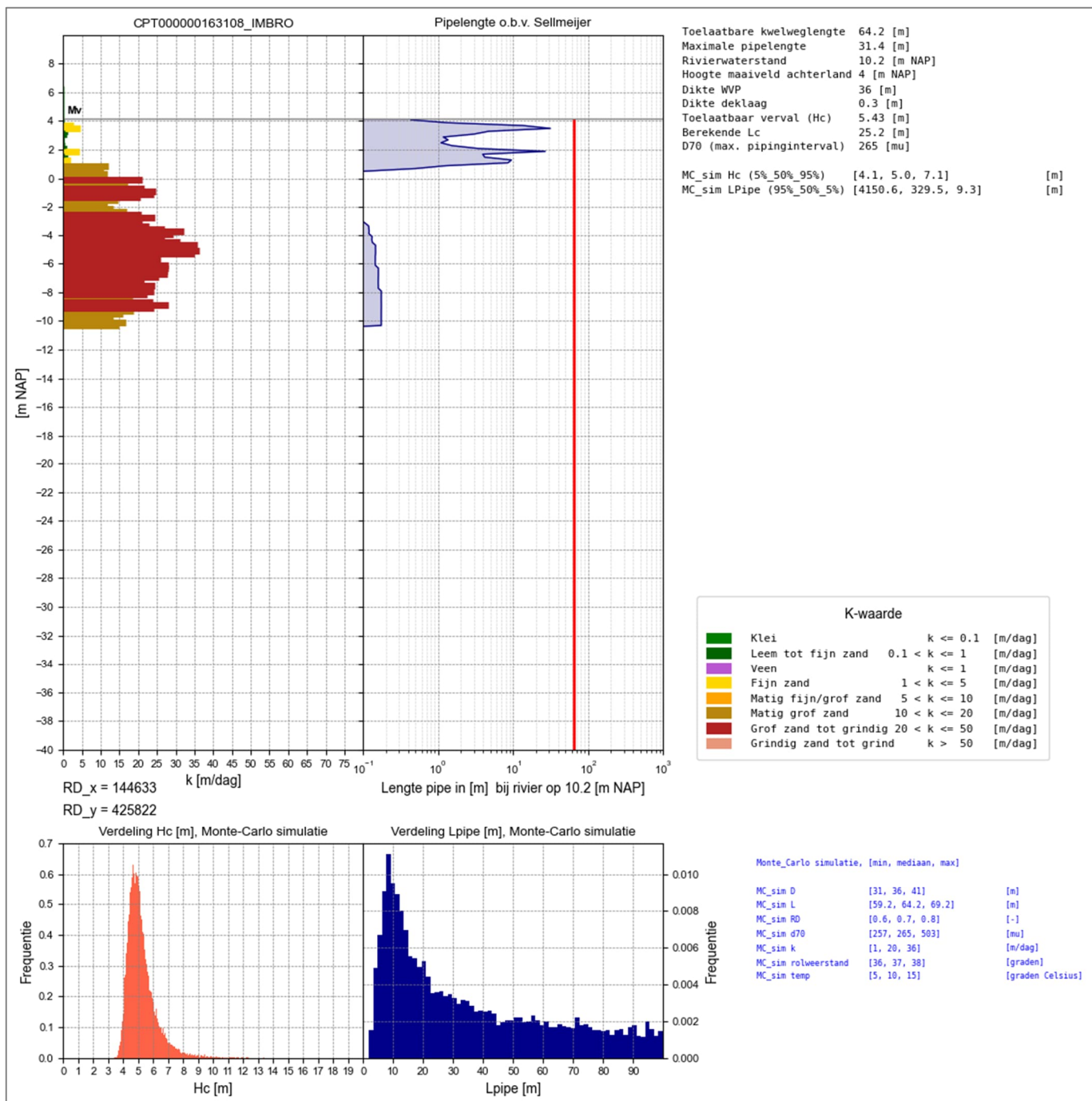


Figuur 4.3.a Locatie bekende wellen (blauwe asteriks) Tuil

In figuur 4.3.b is een interpretatie van de bodemopbouw in combinatie met de berekende kwelweglengte opgenomen bij een extreme rivierstand (+10.2 [m NAP]). Duidelijk is dat er op deze locatie een hoog risico wordt berekend op een doorgaande pipe. Dit is niet verbeterd nadat rond 2011 de beide waterplassen zijn ontgraven (de blauwe vlakken met de PL 22 codering erin). Deze bestonden nog niet tijdens het hoogwater in 1995.

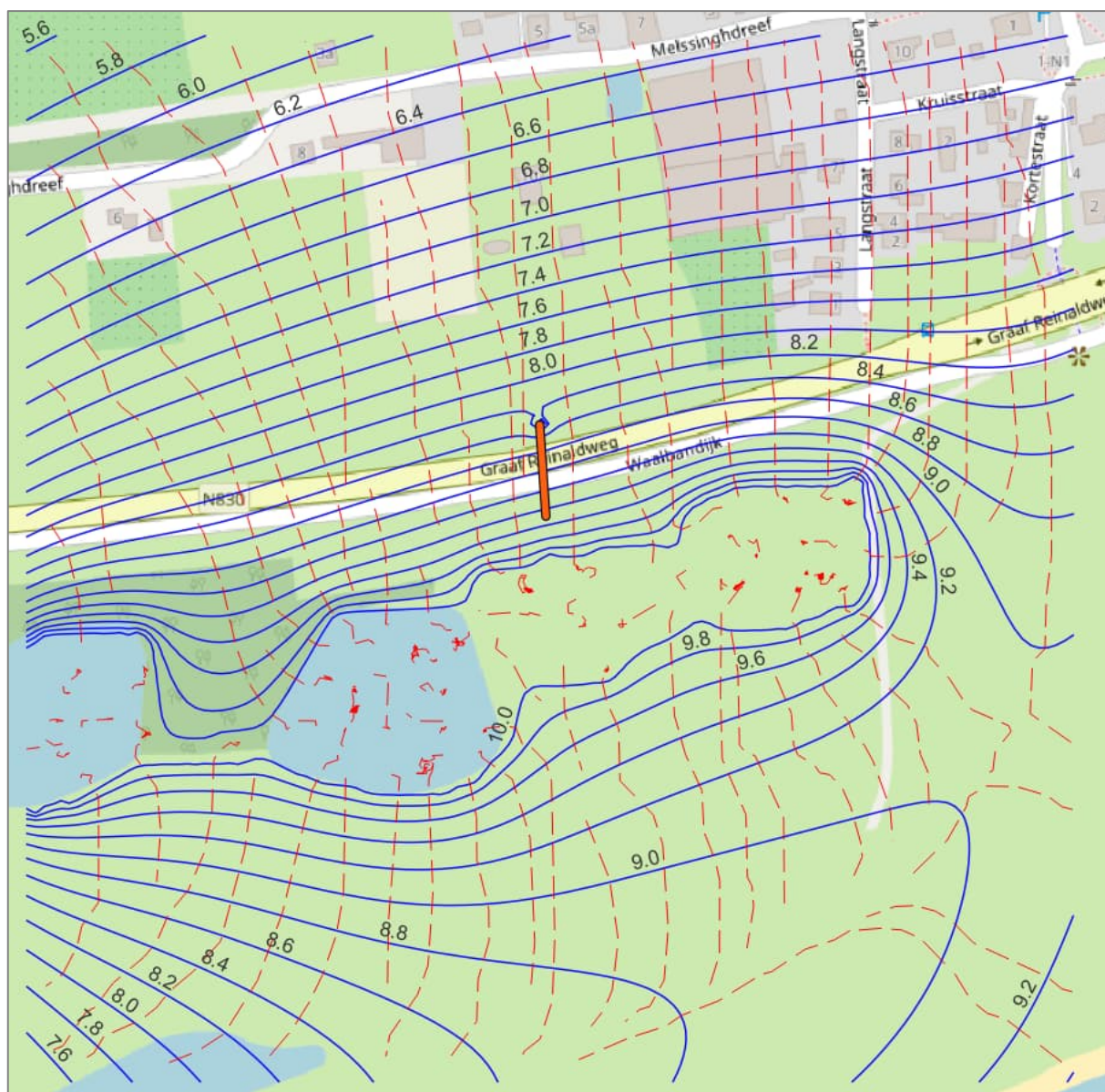
In de Monte-Carlo simulatie geeft 76% van de berekeningen een waarde boven de toegestane kwelweglengte.

<sup>11</sup> [GIS Portaal Wellen \(wellocaties.app\)](#)



Figuur 4.3.b Interpretatie pipe bij extreme rivierstand Tuil.

In figuur 4.3.c is een visualisatie gemaakt van de isohypsen in blauw [m NAP]; stromingspatroon, rood gestreept en maximale pipelengte (oranje) bij extreme rivierstand (+10.2 [m NAP]) te Tuil.



Figuur 4.3.c Piping bij Tuil, schematisering



## 5 Kartering WAM

Het volgende hoofdstuk is een idee om binnen een willekeurig dijkproject (hier voorbeeld WAM) te rekenen (voor een eerste indicatie) met een automatische beoordeling van het pipingrisico.

Pipingrisico wordt hier gedefinieerd als *“de kans op piping op een punt langs de kruinlijn van een te beoordelen dijkvak waar, op basis van randvoorwaarden en een Monte-Carlo simulatie van de toegestane pipelengte, minder dan 100% van de simulaties als veilig te klasseren is.”*

Hiervoor wordt het Sellmeijer-script in Python gevoed met de volgende variabelen:

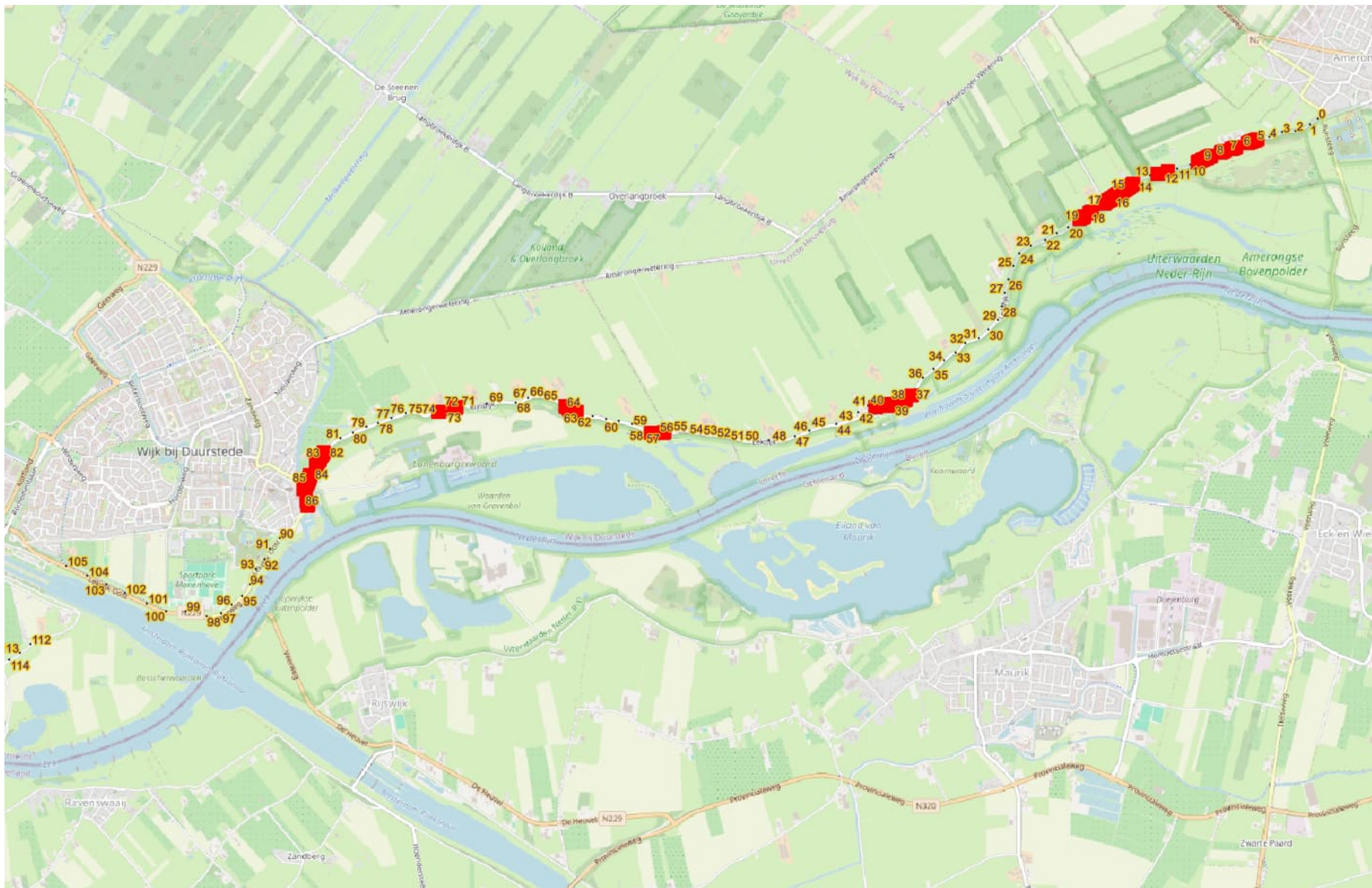
- Een lijn over de kruinlijn waarin per 10 meter een punt wordt gegenereerd (binnen Qgis). Deze punten zijn de referentie uitgangspunten refx en refy
- Een aparte directory wordt gemaakt waarin alle sonderingen zijn opgenomen dieper dan 10 meter onder maaiveld binnen een afstand van 250 meter van de kruinlijn (Python script)
- Per referentiepunt wordt het intredepunt bepaald. Dit gebeurt op basis van de meest dicht bij het referentiepunt liggende potentiële intredepunt in het voorland (denk aan watergangen, afgravingen etc, dit is een berg shapefiles, bijvoorbeeld een leggerkaart van het Waterschap). Dit is punt (pipex, pipey) in het script
- Per referentiepunt wordt het theoretische uittredepunt bepaald (pipx, pipy). Omdat deze lastig van te voren te bepalen is wordt in deze simulatie uitgegaan van een worst case punt, te weten de binnenteenlijn. Als dit uittredepunt verder weg ligt is er minder kans op piping. Dit maakt de aanname robuust.
- Per referentiepunt (refx, refy) wordt geautomatiseerd de meest dichtbijgelegen sondering opgezocht die in het script wordt aangehouden voor de lokale bodemopbouw.
- Met behulp van de TIM modules wordt op basis van deze bodemopbouw de drukverloop tussen het intredepunt (pipex, pipey) en het uittredepunt (pipx, pipy) bepaald. Hiervoor wordt worst case uitgegaan dat in het intredepunt contact is tussen het buitenwater en de watervoerende laag.
- De waterstand in het buitenwater wordt automatisch opgehaald uit de 207510000 tabel (extreme waarde in 2075) per referentiepunt-locatie.
- De grondwaterstand bij het pipx,pipy punt wordt uitgelezen uit een op basis van binnen DINOLoket aanwezige informatiegemaakte GHG kaart.
- De top van het onderliggende watervoerende zandpakket wordt per dijkpaal bepaald (*visueel, nog te automatiseren*) en gebruikt voor de diepte van het intredepunt en de dikte van de kleilaag (deze laatste is onderdeel van de Sellmeijer formule)
- De onderzijde van het watervoerende pakket wordt generiek op -42 [m NAP] gezet. Dit kan bij meer gegevens ook per referentielocatie worden geautomatiseerd.

- Met behulp van deze sondeerinterpretaties met randvoorwaarden worden extreme waarden bepaald die als invoer (per referentiepunt) voor de Monte-Carlo simulatie worden gehanteerd. Hiervoor wordt per referentiepunt (refx, refy) een aantal van 25000 simulaties doorgerekend waarbij de volgende grenzen worden aangehouden:
  - Dikte WVP +/- 5 meter
  - Toegestane kwelweglengte +/- 5 meter
  - Relatieve dichtheid 0.6-0.7-0.8
  - D70 tussen gemiddelde -1 standaarddeviatie en +2 standaarddeviaties
  - K-waarde uit lokale sondering tussen 1 [m/dag] en gemiddelde +3 standaarddeviaties [m/dag]
  - Rolweerstand 36-37-38 graden
  - Watertemperatuur tussen 5 en 15 graden Celsius

Van alle uitkomsten van de Monte-Carlo simulatie wordt vervolgens het percentage *niet voldoende* (*kans op piping* >0.1%) bepaald. Deze locaties zijn voor de WAM gekarteerd in figuur 6.1.

De benodigde rekentijd voor de 1337 referentiepunten op de WAM kruinlijn bedroeg 60 minuten.





Figuur 6.1 Theoretisch piping risico (rode blokjes)

7 februari 2024

Dick Edelman [info@rvde.nl](mailto:info@rvde.nl)

Pagina 38 van 38