

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 ¹ 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 gepromoveerd² 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.

Disclaimer

Dit document is een inventariserend groeidocument, het is niet bedoeld als verklarend artikel. Inzichten kunnen foutief of overdreven zijn. Het is met name bedoeld als rekenvoorbeeld van Sellmeijer in combinatie met TIM.

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

² On the mechanism of piping under impervious structures, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:7f3c5919-1b37-4de9a552-1f6e900eeaad>

2. Sellmeijer

2.1 Algemeen

De formule van Sellmeijer heeft verschillende verschijningsvormen, afhankelijk van waar de diverse factoren in de te onderscheiden deelformules zijn opgenomen.

- In paragraaf 2.1.1 is de meest 'kale' vorm opgenomen
- In paragraaf 2.1.2 is de versie van Deltares opgenomen,
- In paragraaf 2.1.4 de versie van de schematiseringshandleiding
- In paragraaf 2.1.5. 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 schaalfactor 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 tussen een intredepunt en een uittredepunt in het grondwater zelf dus geen onderdeel.

Voor het bepalen van de mogelijke pipelengte wordt hiervoor gebruik gemaakt van een binnen Deltares ontwikkeld algoritme. Hierin is een drukverschil tussen het intredepunt en het uittredepunt (δH) benodigd. Deze drukken zijn met behulp van de TIM modules per diepte-interval berekend en vervolgens gebruikt om per diepte interval de theoretische pipelengte te berekenen. Hiernaast wordt er een indicatie gemodelleerd van de ligging van de piping in de ondergrond.

Hiervan is in hoofdstuk 3 een voorbeeld opgenomen.

2.2 Basisvorm

In het proefschrift van Sellmeijer en daaropvolgende publicaties³, wordt de volgende basisvorm van de formule aangehouden:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta H_c}{\gamma_n \gamma_b} &> (\Delta H - 0,3d) \\ \Delta H_c &= L F_{resistance} F_{scale} F_{geometry} \\ F_{resistance} &= \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \\ F_{scale} &= \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{KL}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4} \\ F_{geometry} &= 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} - 1 + 0,04}\end{aligned}$$

Sellmeijer doet een aantal suggesties voor de verschillende constanten:

$$\eta = 0.25$$

$$\theta = 37^\circ$$

$$\gamma_w = 16.5 \text{ kn}$$

$$\gamma_b = 10 \text{ kn}$$

Zoals aan de vorm van de formule kan worden afgelezen berust ze voor een belangrijk deel op empirisch onderzoek.

³ Sellmeijer, J. B. (2006): *Numerical computation of seepage erosion below dams (piping)*. In: Verheij, H.J.; Hoffmans, Gijs J. (Hg.): *Proceedings 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-3)*. November 1-3, 2006, Amsterdam, The Netherlands. Gouda (NL): CURNET. S. 596-601.

1.2 Deltares

Binnen publicaties van Deltares⁴ wordt de volgende, iets complexere, versie van de formule gehanteerd:

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

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

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

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

waarin:

- ΔH_c kritieke verval over de waterkering [m]
- γ'_p (schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water [kN/m³]
- γ_w volumegewicht van water [kN/m³]
- θ rolweerstandshoek van de zandkorrels [°]
- η coëfficiënt van White [-]
- κ intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m²]
- 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 ten opzichte van de meest kale vorm toegevoegd, te weten de D_{70m} en de RD/RD_m factor.

⁴ RWS, 2020, Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019, 11203719-019-GEO-0003

2.3 Schematiseringshandleiding

In de schematiseringshandleiding⁵ wordt de volgende vorm voorgesteld

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

$$\begin{aligned} F_{\text{resistance}} &= \eta \frac{\gamma_{\text{sub,particles}}}{\gamma_{\text{water}}} \tan \theta \\ F_{\text{scale}} &= \frac{d_{70,m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70,m}} \right)^{0,4}, \quad \kappa = \frac{v_{\text{water}}}{g} k \\ F_{\text{geometry}} &= 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L} \right)^{2,8} + 0,04} - 1} \end{aligned} \quad (7)$$

Waarin:

- L Kwelweglengte van in- tot uitredpunt: $L = X_{\text{ent}} - X_{\text{exit}}$ [m].
- $\gamma_{\text{sub,particles}}$ Volumegewicht van zandkorrels onder water (= 16,5) [kN/m³].
- η Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (= 0,25) [-].
- d_{70} 70-percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping-gevoelige laag [m].
- κ Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m²].
- k Darcy doorlatendheid [m/s].
- v Kinematische viscositeit van water (voor grondwater van 10° Celsius: $1,33 \cdot 10^{-6}$) [m²/s].
- g Zwaartekrachtversnelling (= 9,81) [m/s²].
- D Dikte van de zandlaag [m].
- $d_{70,m}$ Referentie d_{70} -waarde (= $2,08 \cdot 10^{-4}$) [m].
- θ 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.

⁵ RWS, Schematiseringshandleiding 4.0, WBI 2017, Datum 28 mei 2021

2.4 Pol

In december 2022 verschijnt het proefschrift van Joost Pol⁶.

Hierin hanteert hij de volgende, meer uitgebreide, versie van de Sellmeijer formule:

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

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

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

$$F_g = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{0.28 / [(D/L)^{2.5} - 1] + 0.04} \quad (2.10)$$

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 in berekeningen uiteindelijk weinig grote verschillen met de andere vormen lijken te dragen aan de lengte van de pipe.

⁶ J.C. Pol, 2022, *Time-dependent development of Backward Erosion Piping*, TU Delft

2.5 Python

Teneinde de formule van Sellmeijer te visualiseren zijn de verschillende rekenregels in een pythonscript opgenomen. Op basis van een bekende (bijvoorbeeld uit REGIS, een boring of een sondering) bodemopbouw kan er dan met de formule worden gespeeld om een indicatie te krijgen over de invloed van de diverse parameters op de uitkomst van de berekeningen.

In deze notitie is gekozen voor een invoer vanuit sondeergegevens en een laagindeling op decimeterschaal. Dit is niet bedoeld als simulatie van de 3D werkelijkheid, maar om te begrijpen hoe de verschillende factoren in de formules samenwerken bij het ontstaan van een pipe.

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

De uitleg en de impact van de respectievelijke onderdelen is opgenomen in hoofdstuk 4.

De formule voor de Lpipe is afkomstig van Deltares⁷

```
### 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

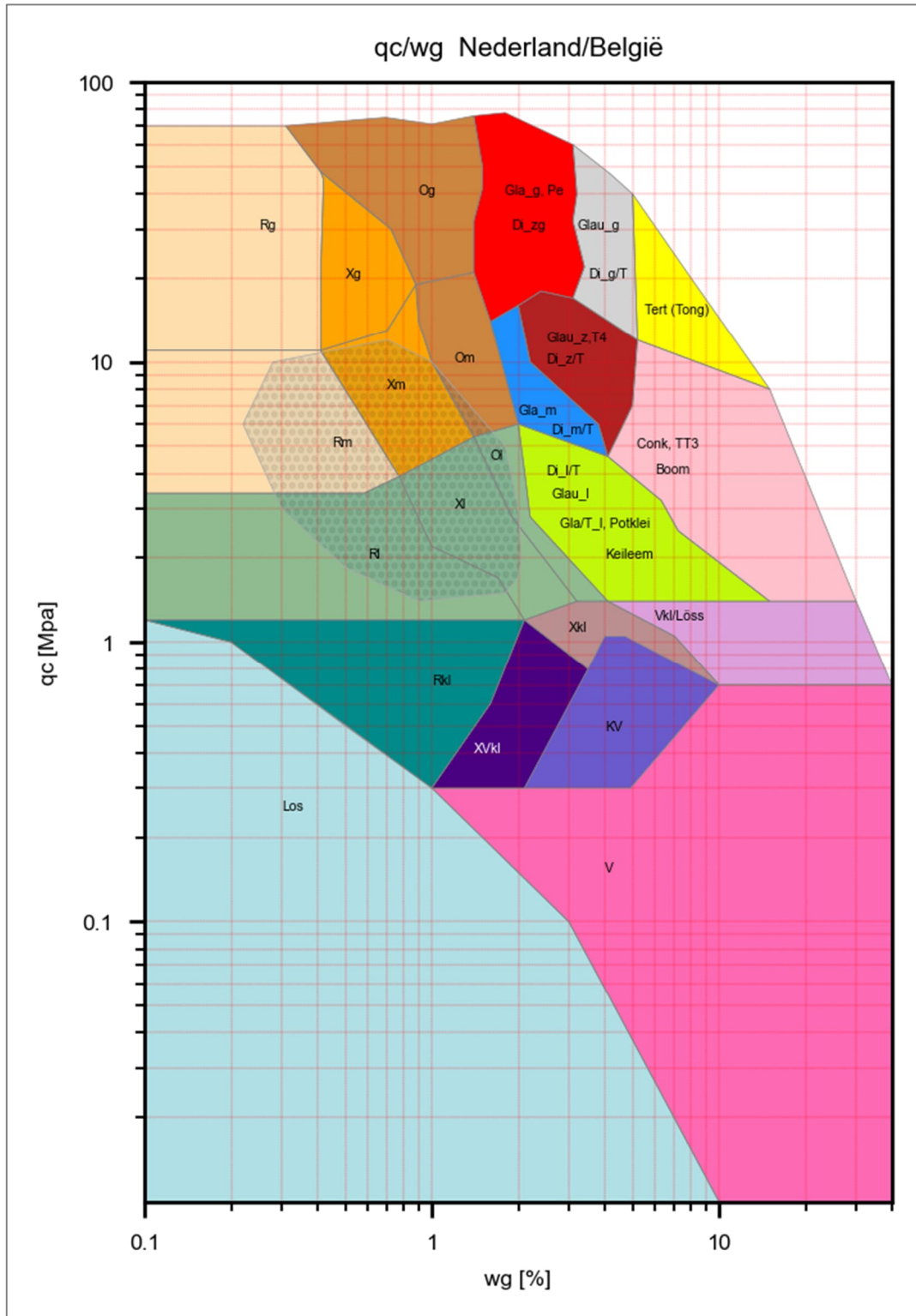
df['Lpipe'] = np.where(df['H']/df['Hc'] >0,Lc*(164.535456 * pow(df['H']/ df['Hc'], 8.0) - 570.088738 * pow( df['H']/ df['Hc'], 7.0)+
797.636538 * pow(df['H']/ df['Hc'], 6.0) - 575.466330 * pow( df['H']/ df['Hc'], 5.0) + 227.705051 *
pow(df['H']/ df['Hc'], 4.0) - 48.9853799 * pow( df['H']/ df['Hc'], 3.0) + 5.96645859 *
pow(df['H']/ df['Hc'], 2.0) -3.67385412e-01 * (df['H']/ df['Hc']) + 0.00757329545), Lc*0.001)
```

Naast de laagindeling is er middels de correlatie qc/wg in de sondering een indicatie gemaakt van de bodemopbouw. Het bodemtype Kg zijn de recente (schone) rivierafzettingen. De overige factoren worden zoals gezegd in hoofdstuk 4 uitgewerkt.

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

3. 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 3.1).



Figuur 3.1 Bodemtypes aan de hand van qc/wg verhouding

Hierin is:

T (Bodemtype)	
	Zand, sortering = goed
	Zand, sortering = matig
	Zand, sortering = slecht
	Zandige klei tot leem
	Klei
	Grof Bortel, Peelo-afzettingen, Matig grof Di/T
	Bortel, Matig fijn Di/T
	Lemig Bortel, Potklei, Keileem, Lemig Di/T
	Grof Glauconietzand, Grof Di/T
	Glauconietzand, Diestienzand, T4
	Geconsolideerde klei, Boomse klei, Topklei T3
	Tertiaire afzettingen, Tongrien
	Venige klei, Löss
	Mineraalarm veen
	Humeuze klei
	Kleiig veen
	Compact kleiig veen, Basisveen
	Cohesiearm

Het gestippelde grijze vlak in (vooral) de elementen Rm, Xm, RI en XI is een deel van de grafiek waarbinnen verwekingsgevoeligheid een rol speelt. Dit valt vaak samen met de zone waar piping verdachte situaties zijn opgetreden.

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 bodemparemeters geautomatiseerd worden gebruikt in berekeningen.

4. Sellmeijer (de onderdelen)

4.1 Weerstandsfactor (formule 2.8 in Pol)

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

1.2.1 Correctiewaarden

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

1. ρ_s, ρ_w Volumegewicht korrels en water (bij 10°)
2. D_r Pakkingsgraad van de matrix (tussen 0 en 1) wordt voorlopig op 0.6 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 in het rivierengebied afgeleid 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 $df['Cu'] = 2.4806 \cdot (\text{pow}(df['k'], -0.005))$
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
Rg, Xg	30
Rm, Xm, Og	50
Rl, Xl, Om	70
Glal	10
Overige types	90

7. KAS_m Maatgevende waarde, 0.498

4.2 White's constante

In 1940 publiceert C.M. White een artikel⁸ 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.

Downloaded from https://roya

With regard to their equilibrium as they lie on the bed, grains of diameter k usually occupy more area than k^2 . A packing coefficient η , defined as k^2 times the number of grains per unit area, conveniently expresses their closeness. When a mean stress τ is applied to the bed each exposed grain transmits a horizontal force $\tau k^2/\eta$ from fluid to bed. In the high-speed case, when tangential components are negligible, the resultant force, if the grain be regarded as spherical, passes through its centre, and the forces are in equilibrium and the grain about to move when, as in figure 1,*

$$\tau = \frac{\pi}{6} \rho' g k \tan \phi, \quad (1)$$

where ρ' is the effective density of the grain in the fluid, and ϕ is the angle of repose of the surface layer of grains. For the slow-speed case the corresponding force system is shown in figure 2, where it is seen that the line of

* That the force on the grain is nearly horizontal seems to be proved by an experiment described later (p. 333).

324 C. M. White

action lies above the centre of gravity, and, since the height at which the force acts cannot be predicted analytically, an experimental coefficient α must be included in the equation which becomes

$$\tau = \alpha \eta \frac{\pi}{6} \rho' g k \tan \phi. \quad (2)$$

Equations (1) and (2) concern the equilibrium of grains just as they are about to move, and in both the value of τ is a local and instantaneous one, often considerably in excess of the time average for the whole bed, so experimental arrangements which will verify (1) or determine α in (2) are not easily found.

FIGURE 1. Equilibrium of an individual sand grain when the fluid acts normally to the surface and tangential stresses are negligible; $V_* k/\nu > 3.5$ and assuming that the "lift" component is negligibly small.

In de experimentele opstelling wordt uitgegaan van de volgende data:

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

⁸ C.M. White, *The equilibrium of grains on the bed of a stream*, *Proc. R. Soc. Lond. A* 1940.174:322-338

Met als uiteindelijke conclusie:

CONCLUSION

In conclusion it can be emphasized that despite uncertainties, often as much as $\pm 25\%$, the experiments establish that, at low speeds, there is a wide range of $V_* k/\nu$ 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 $\tan \phi$. Rounded sand grains subjected to a steady viscous drag begin to move when

$$\tau = 0.18\rho' gk \tan \phi.$$

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' proefschrift⁹ geponeerd. Mogelijk dat dit (0.25) een minder robuuste waarde is. Anderzijds hanteert Sellmeijer in zijn proefschrift een rolweerstandwaarde van 41° , terwijl een waarde van 37° - 38° meer overeen lijkt te komen met praktijkmetingen.

Deze parameters van Sellmeijer leiden tot een kortere pipelengte (*ceterus paribus*) dan een keuze voor een hogere White's constante en kleinere rolweerstand.

⁹ J.B. Sellmeijer, *On the mechanism of piping under impervious structures*, proefschrift, TU Delft, 1988

4.3 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

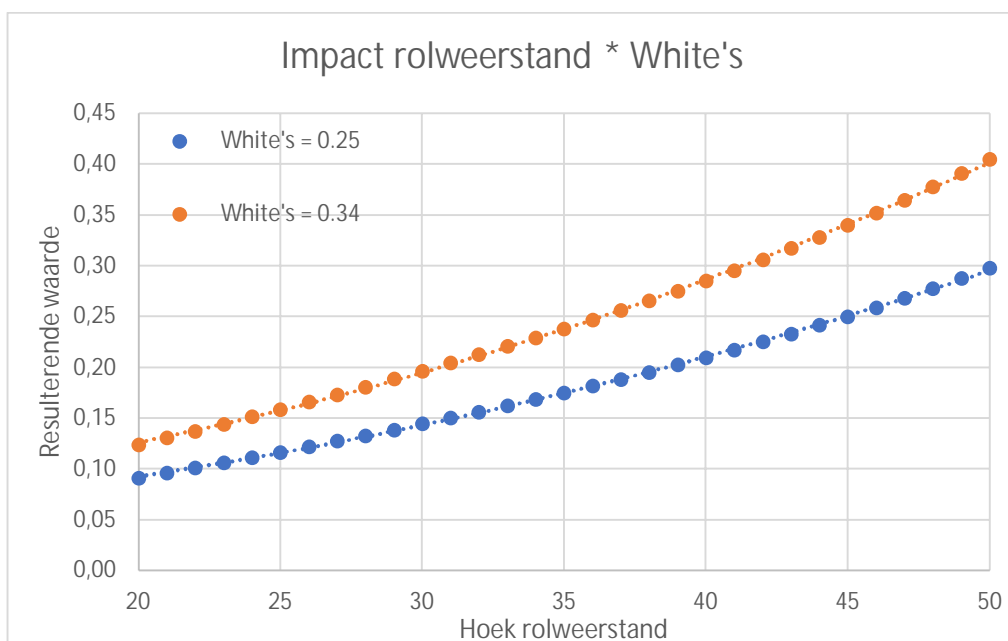
Description	USCS_classificatie	Soil friction angle [°]		Specific value	Reference
		min	max		
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	33	40		[1],[2],
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	32	44		[1],
Sandy gravels - Loose	(GW, GP)			35	[3 cited in 6]
Sandy 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],
Clayey 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 slechter gegradeerd zand) of 38° (goed gegradeerd zand) is dus op zich al een conservatieve.

De combinatie van deze twee parameters op de pipelengte voor normale zandige ondergrond ligt rekentechnisch tussen 0,18 en 0,30, dus een significante waarde. In figuur 4.1 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.



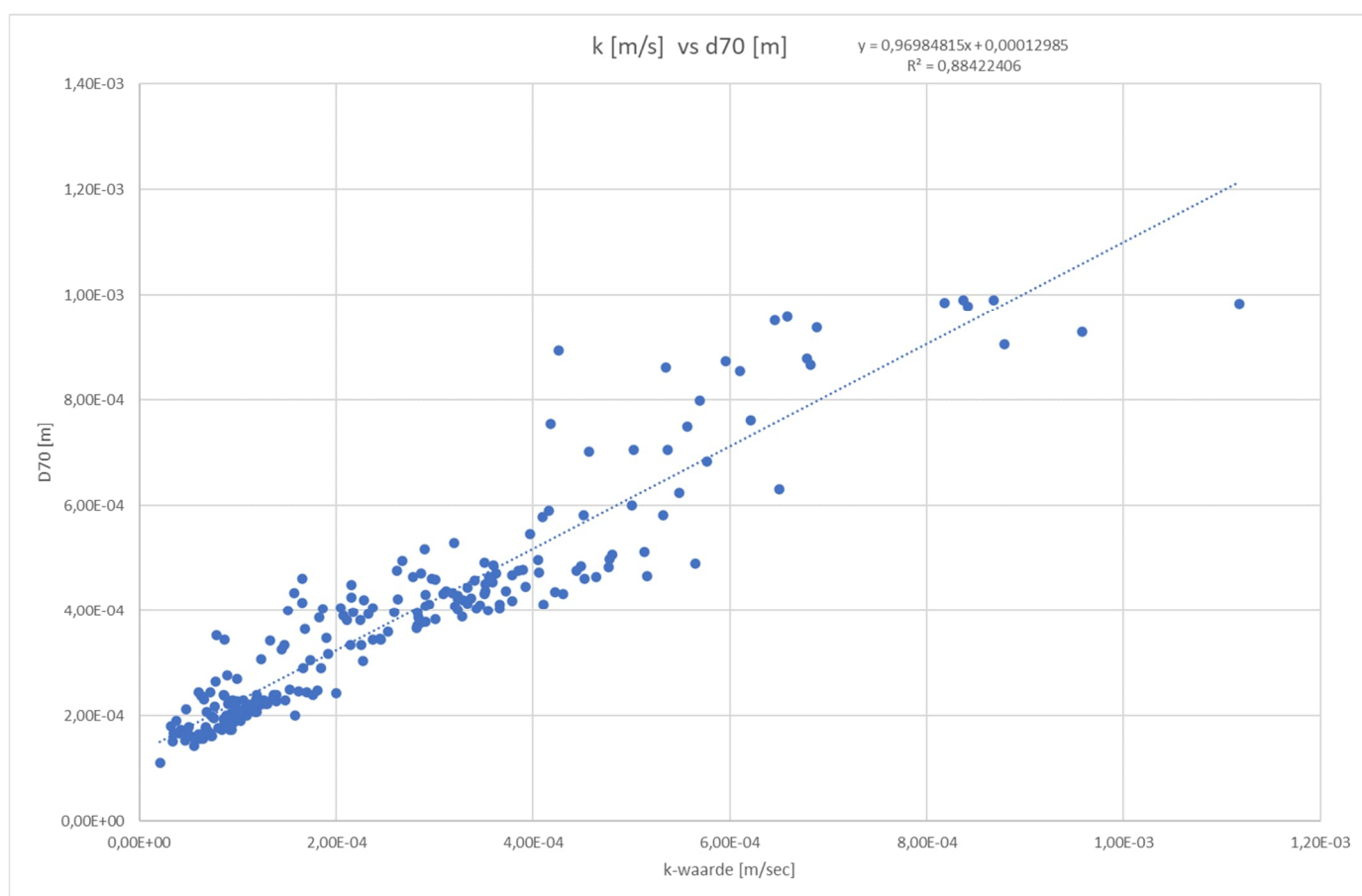
Figuur 4.1 Invloed White en rolweerstand op pipelengte

4.4 Schaalfactor (formule 2.9 in Pol)

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

D70

Deze wordt in het Pythonscript berekend aan de hand van in laboratorium bepaalde korrelgrootteanalyses (KGA) in het rivierengebied. 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 4.2 Verband in rivierengebied tussen k-waarde en D70

Het hierin berekende verband is vervolgens aangehouden om per laag in de overige sonderingen een benadering te maken van de daar te verwachten D70-waarde.

D70m

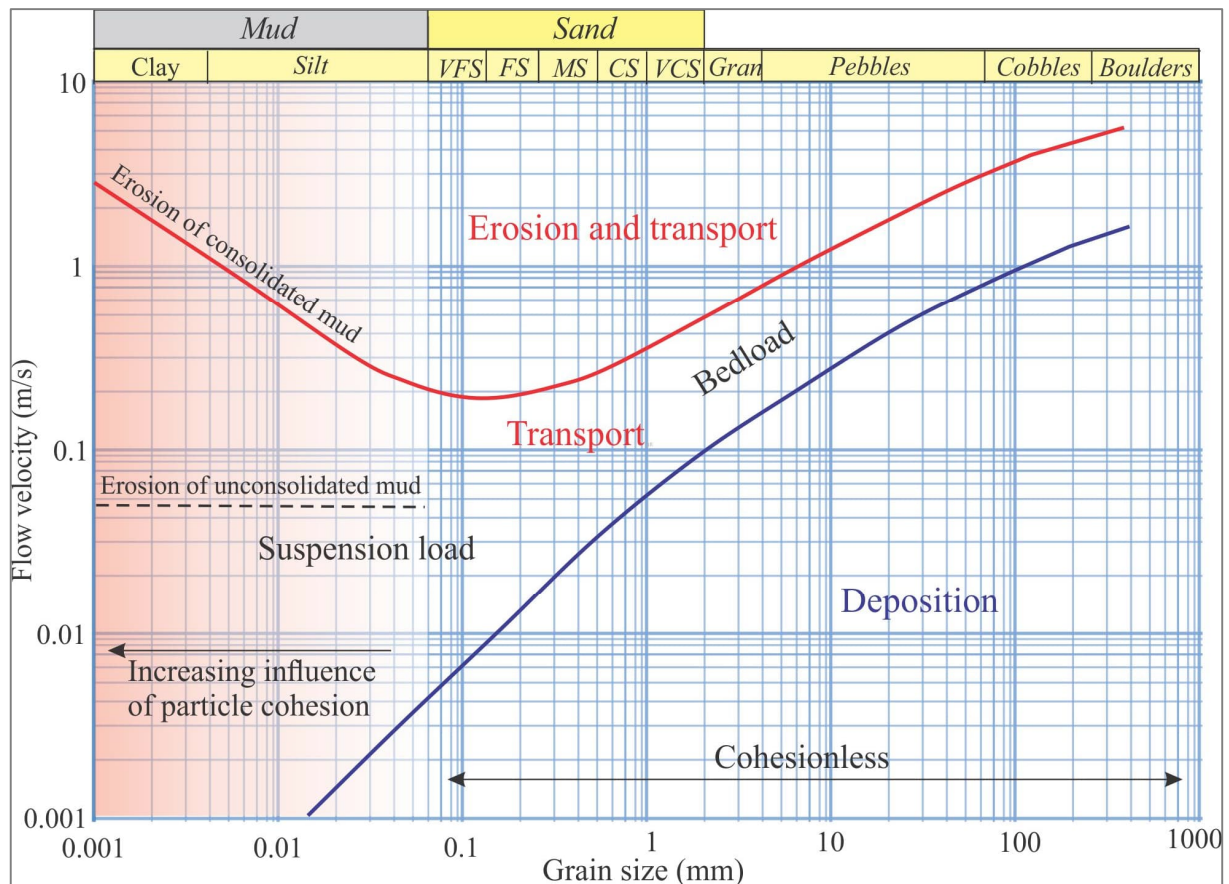
De D70m is een korrelgrootte correctiefactor die voortvloeit uit kleinschalige praktijkproeven. Ze is vastgesteld op een waarde van 208μ ($2.08 \cdot 10^{-4}$ [m]) op basis van laboratoriumomstandigheden.

Deze waarde is van substantiële invloed op de berekening van de pipelengte.

Uit observaties bij daadwerkelijke pipes komt overigens naar voren dat er eerste fijnkorrelig materiaal uitstroomt voordat grover materiaal in beweging komt.

Dit lijkt conform het Hjulstrom diagram (figuur 4.3).

Een waarde van 140μ , het minimum in het Hjulstrom diagram is dan misschien een meer logische waarde voor de D70m plaats van 208μ .

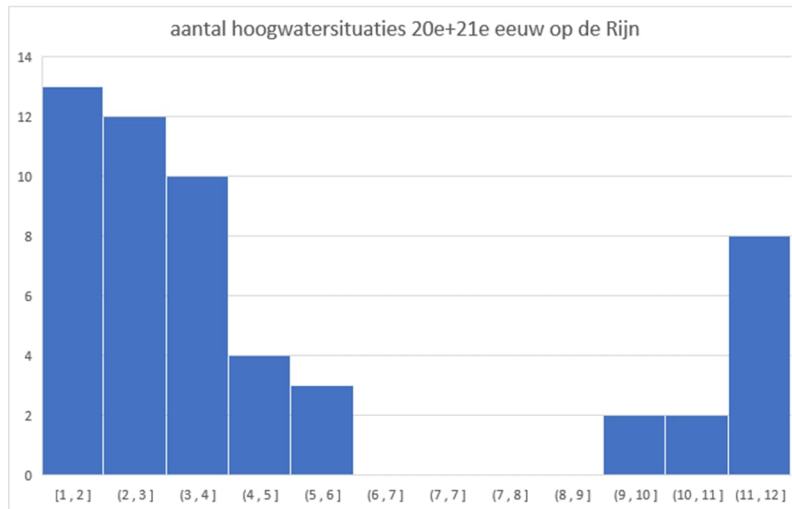


Figuur 4.3 Hjulstrom diagram met minimum voor erosie bij circa 140μ

Dynamische viscositeit

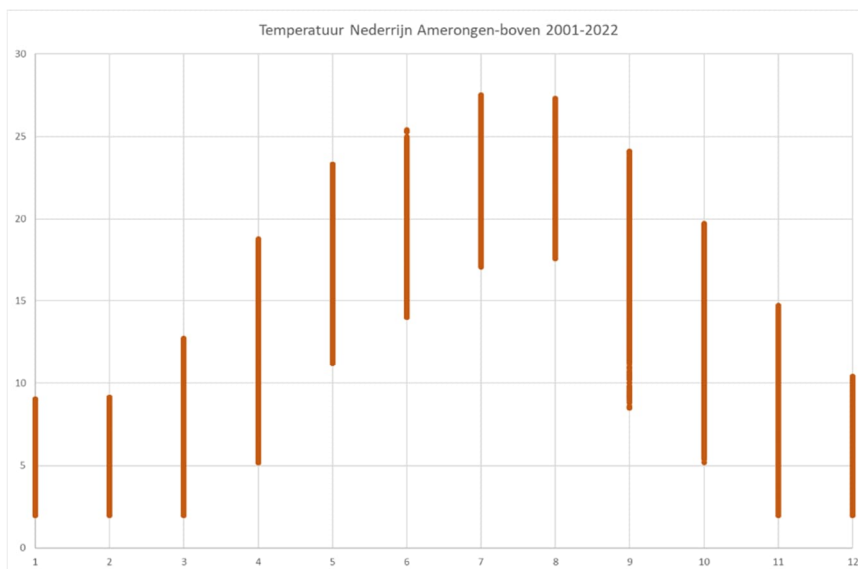
In de Sellmeijer formule wordt standaard gerekend met de kinematische viscositeit van water bij een temperatuur van 10° Celsius. Hierbij hoort een waarde van $1.3081 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$

Nu wil het feit dat 70-80% van de hoogwatersituaties op de Nederrijn 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, hierin is het gemeten temperatuurinterval in de desbetreffende maand opgenomen.

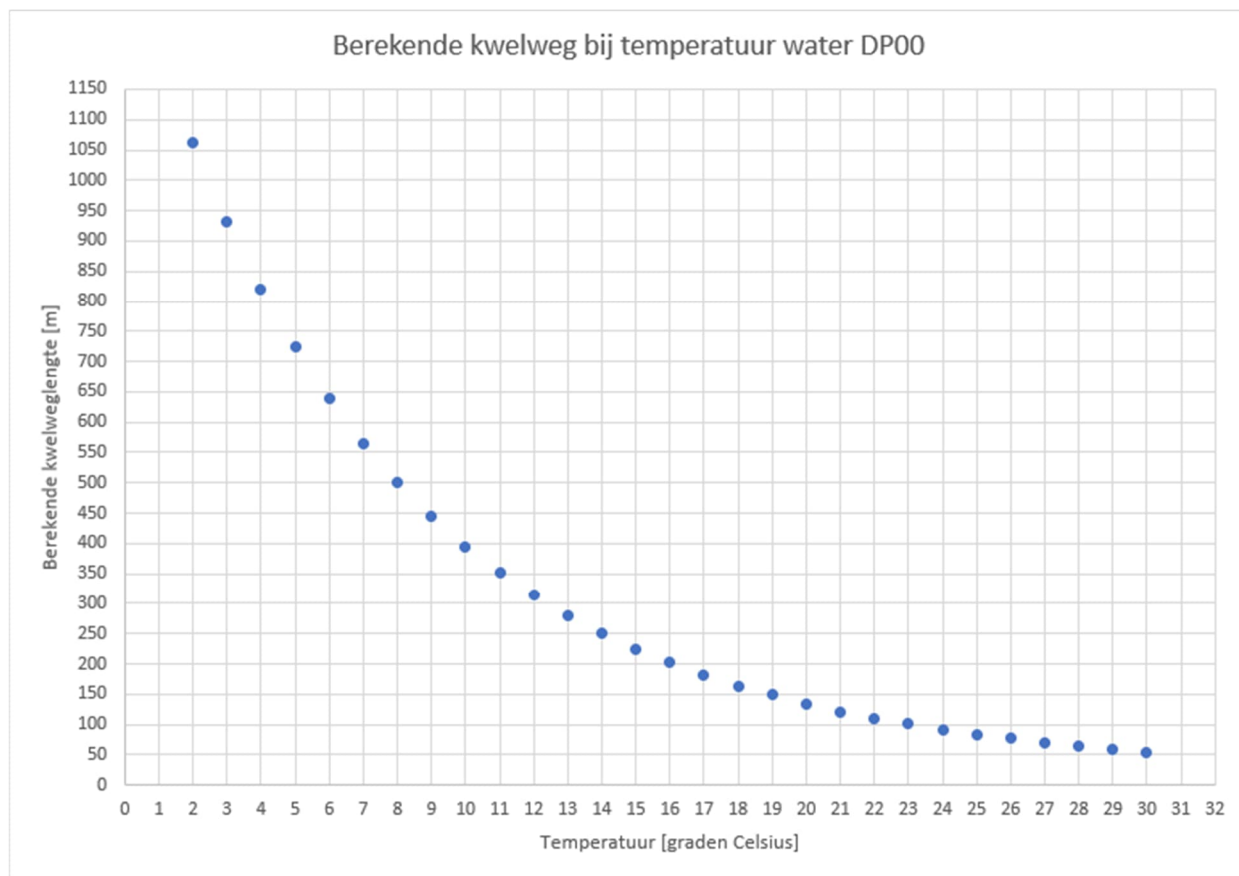


Figuur 2.2.3.b Temperatuur Rijnwater per maand

Dan zou het misschien logischer zijn om te rekenen met een kinematische viscositeit bij 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 4.4). Hieruit komt naar voren dat deze parameter niet te verwaarlozen is..



Figuur 4.4 *Invloed temperatuur water op berekende kwelweglengte*

Vraag aan Helpdesk Water

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.

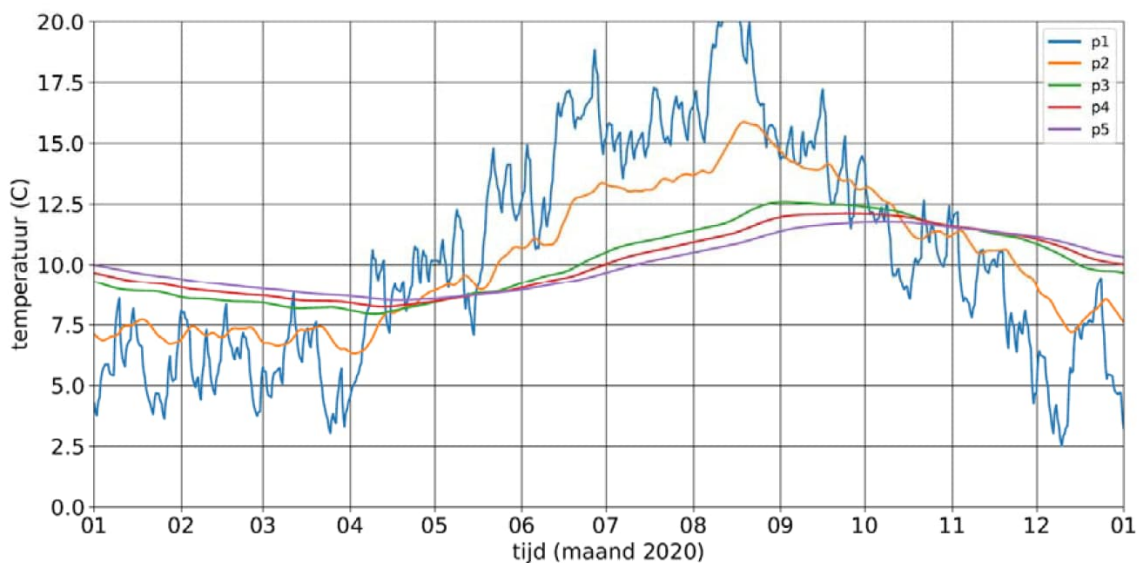
Redenen hiervoor zijn:

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) lijkt 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 (κ 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 (μ)

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

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

L (kwelweglengte)

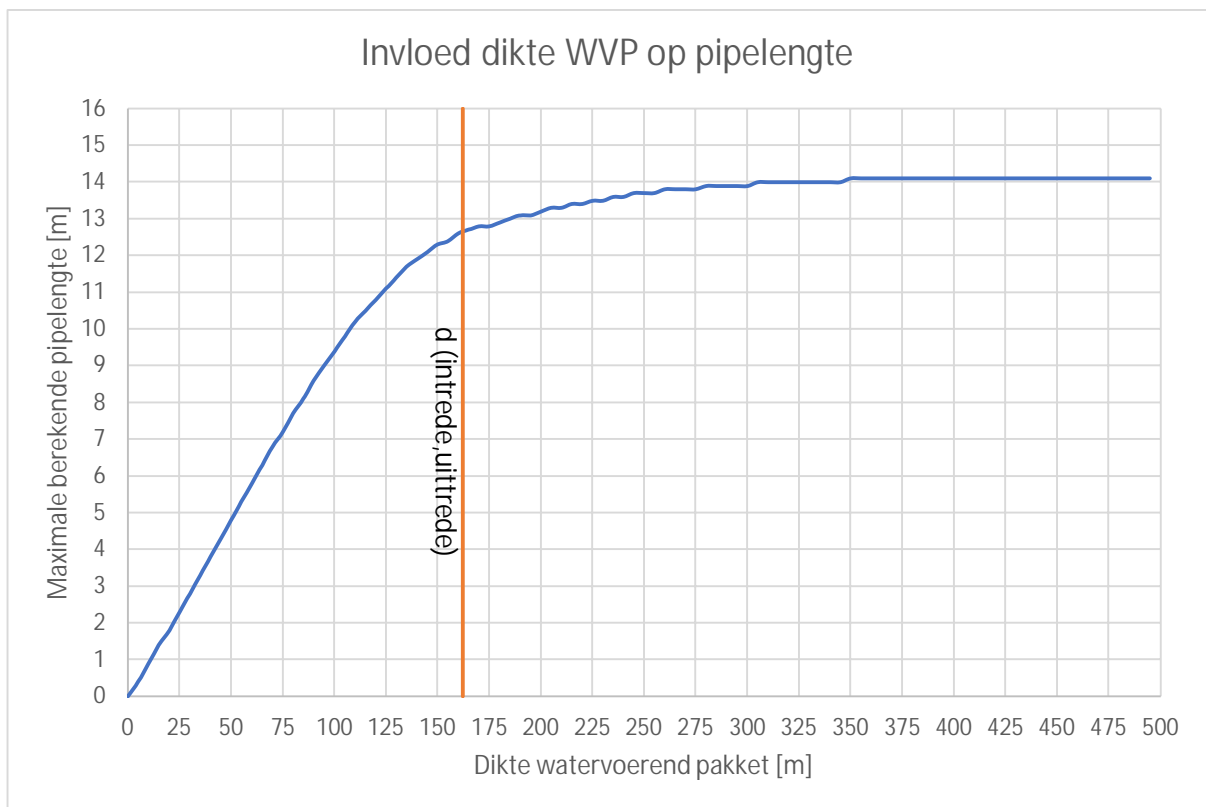
De afstand tussen intredepunt en uitiredepunt is de waarde L. Dit is een handmatig in te geven waarde. Op locaties waar een pipe is ontstaan en waar het intredepunt duidelijk is kan de formule van Sellmeijer in theorie geijkt worden.

4.5 Geometriefactor (formule 2.10 uit Pol)

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

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 doorgererekend (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 rekentechnisch na een zekere dikte.



Figuur 4.5 Invloed Dikte WVP op de pipelengte

4.6 Debieten

Bij het doorrekenen van de pipelengte met behulp van TIM is het tevens mogelijk om het uitstromende debiet uit de te berekenen. Op basis van gepubliceerd onderzoek¹⁰ kunnen deze berekende debieten vergeleken worden met de daadwerkelijk gemeten debieten.

In onderstaande tabel 7 zijn een aantal gemeten debieten opgenomen.:

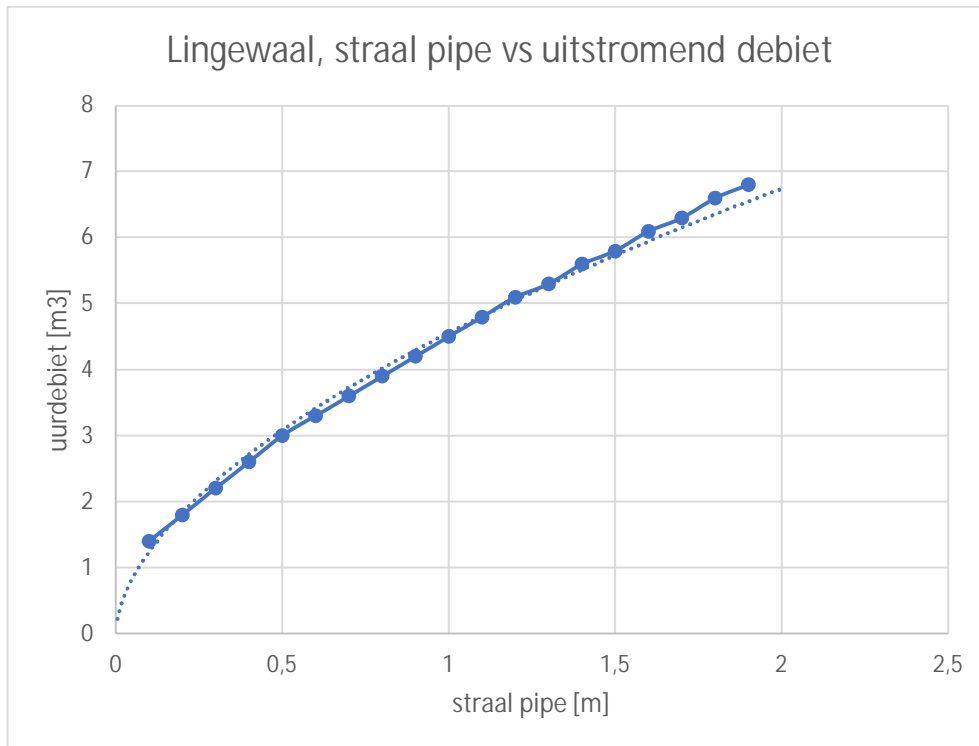
Tabel 7. Vergelijking tussen het debiet wat bepaald is op basis van de zeefkromme en de gemeten debieten

	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

¹⁰ Acacia, Rivierenland, POV-piping Wellen onderzoek, Eindrapport, 16 maart 2018

Diameter pipe

Voor de locatie Lingewaal is, op basis van de data van 17-11-2017 (tabel vorige paragraaf), de invloed van de pipestraal bij het uitstredpunt berekend. Voor deze locatie is het volgende verband gevonden (figuur 4.6)



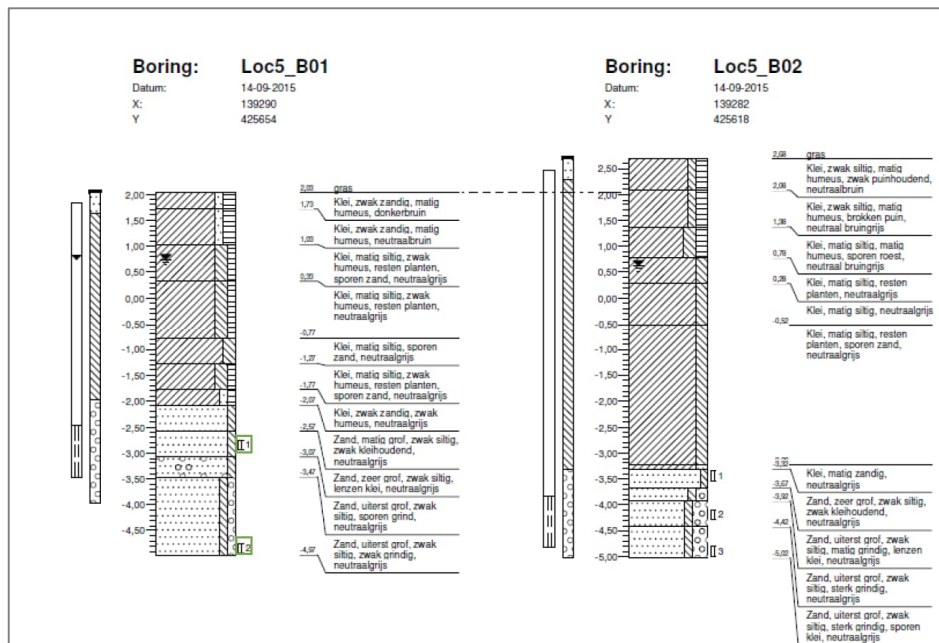
Figuur 4.6 Indicatie invloed straal (= halve diameter!) op uitstromend debiet.

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). In praktijk zal bij een beginnende wel al het materiaal uit een cirkel rondom de wel komen, pas na enige tijd zal de pipe zich naar de rivier gaan graven. Op basis van deze gedachtegang zou op een zeker moment de sediment toevoer dus kunnen gaan afnemen bij groeiende pipe (overgang 'cirkelhappen' naar 'pipehappen').

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 4.7). Naar het zuiden toe (Loc5-B02 en sondering CPT...163065) ligt de top van dit WVP dieper, te weten tussen -3 en -3,5 [m NAP].

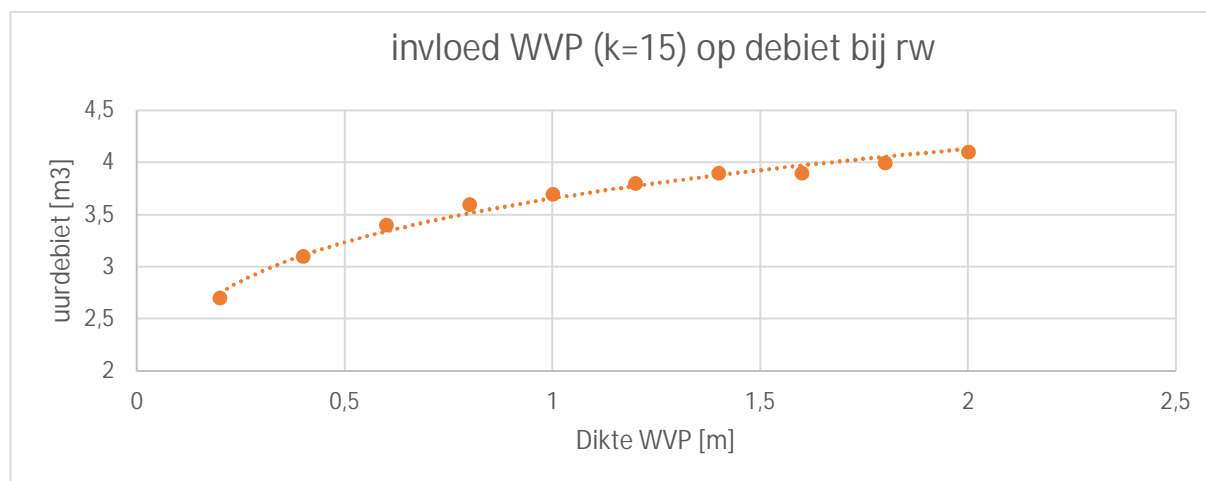


Figuur 4.7 Boringen bij wel Lingewaal

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 4.8



Figuur 4.8 Invloed dikte ondiep WVP op debiet

Dit soort zandbanen op een WVP 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.

4.7 Deltares formule¹¹

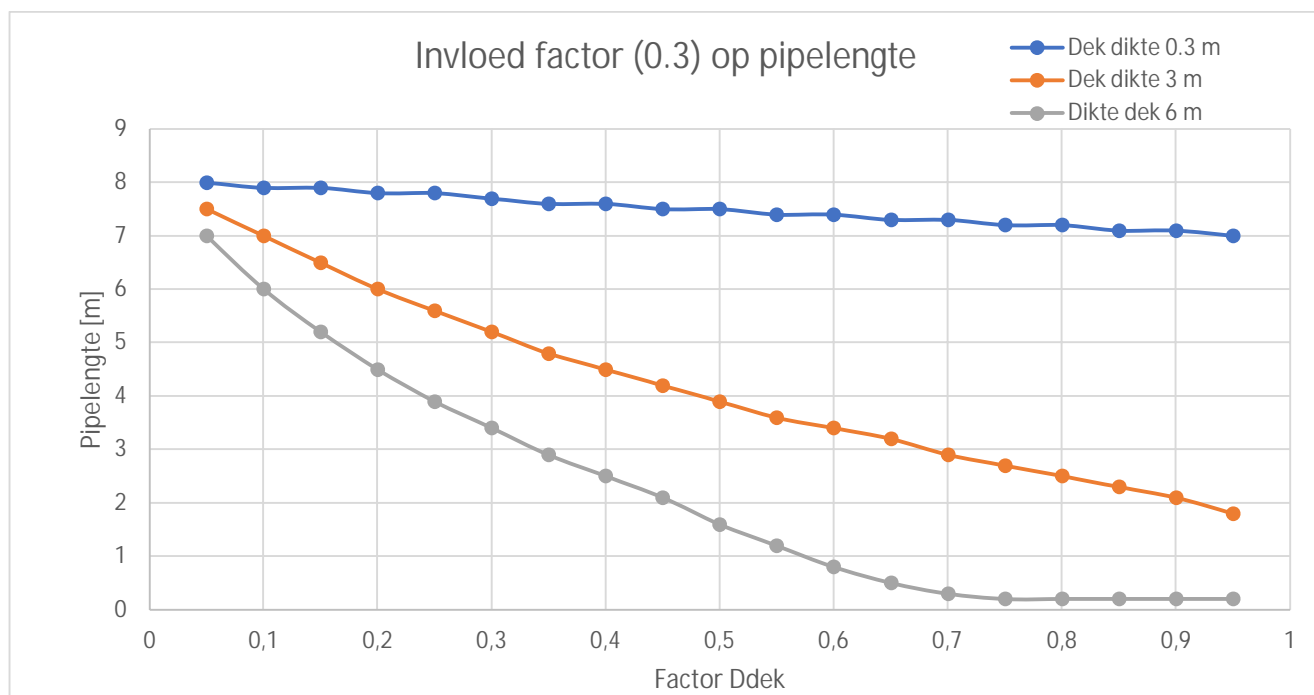
In de Deltares formule voor de berekening van de pipelengte ($df['Lpipe']$) is een mitigerende factor op de $df['H']$ (het verschil in stijghoogte tussen intrede en uittredepunt) ingebouwd met een waarde van $0.3 \cdot$ de dikte van de deklaag. Dit vindt zijn oorsprong in het gegeven dat door de deklaag 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 rivierengebied is een vergelijk gemaakt voor het effect op de pipelengte voor verschillende (theoretische) factorwaarden, Ddek, en de dikte van de deklaag (figuur 4.9).

```
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 4.9 Invloed Ddek factor op pipelengte.

Hieruit komt naar voren dat de dikte van de deklaag (een relatief eenvoudig te karteren parameter) van zeer grote invloed is op de pipelengte. Deltares adviseert om een deklaag van meer dan 6 meter niet meer als pipegevoelig te beschouwen.

¹¹ Deltares, Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden, 11206817-010-GEO-0001, Versie 1.0, 23 februari 2022, definitief

5. 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 drukverschillen 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, vooral bedoeld als ideevormend, 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 5.1.

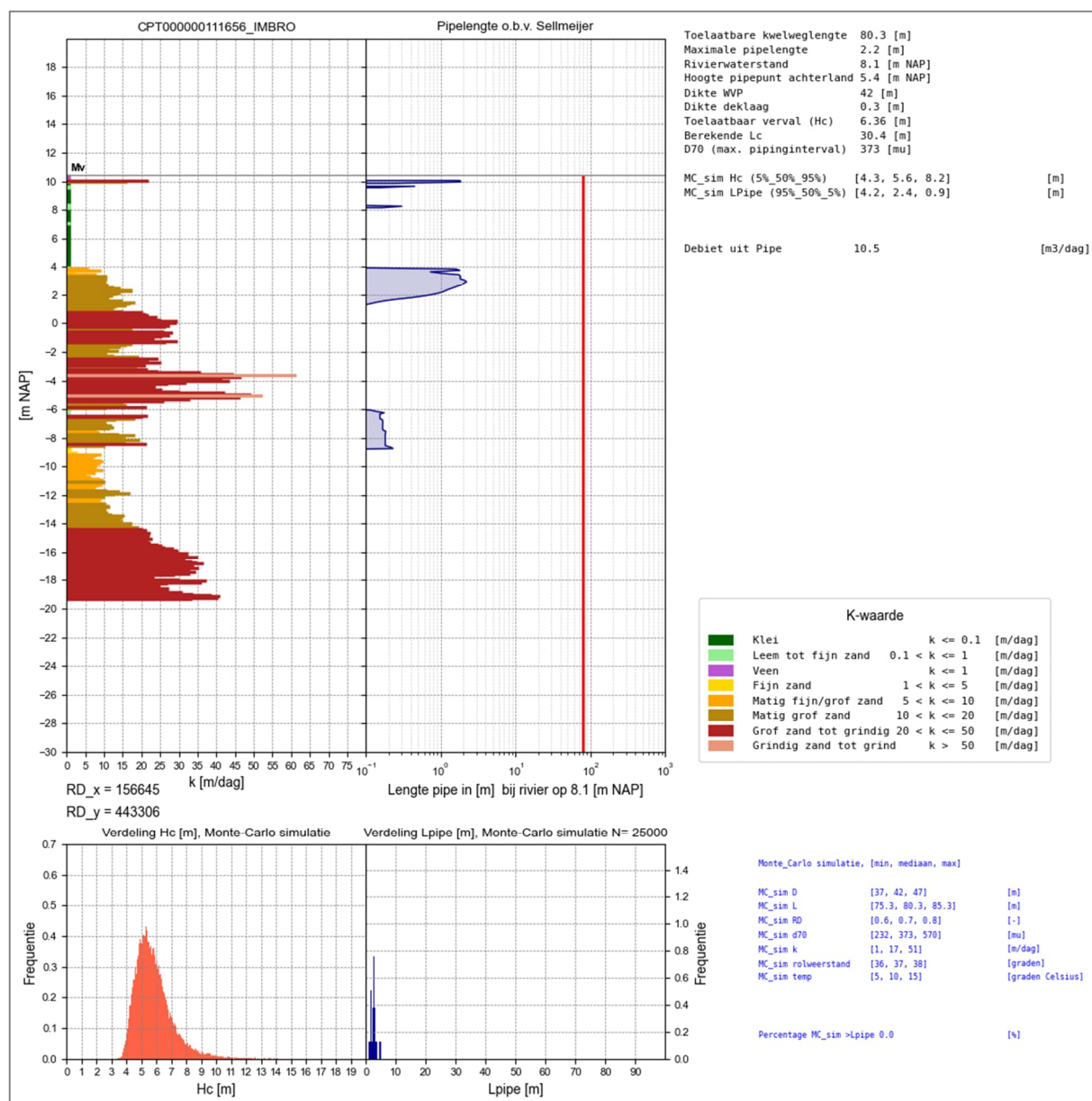


Figuur 5.1 Locatie voorbeelden

5.1 DP38 Amerongen

Algemeen

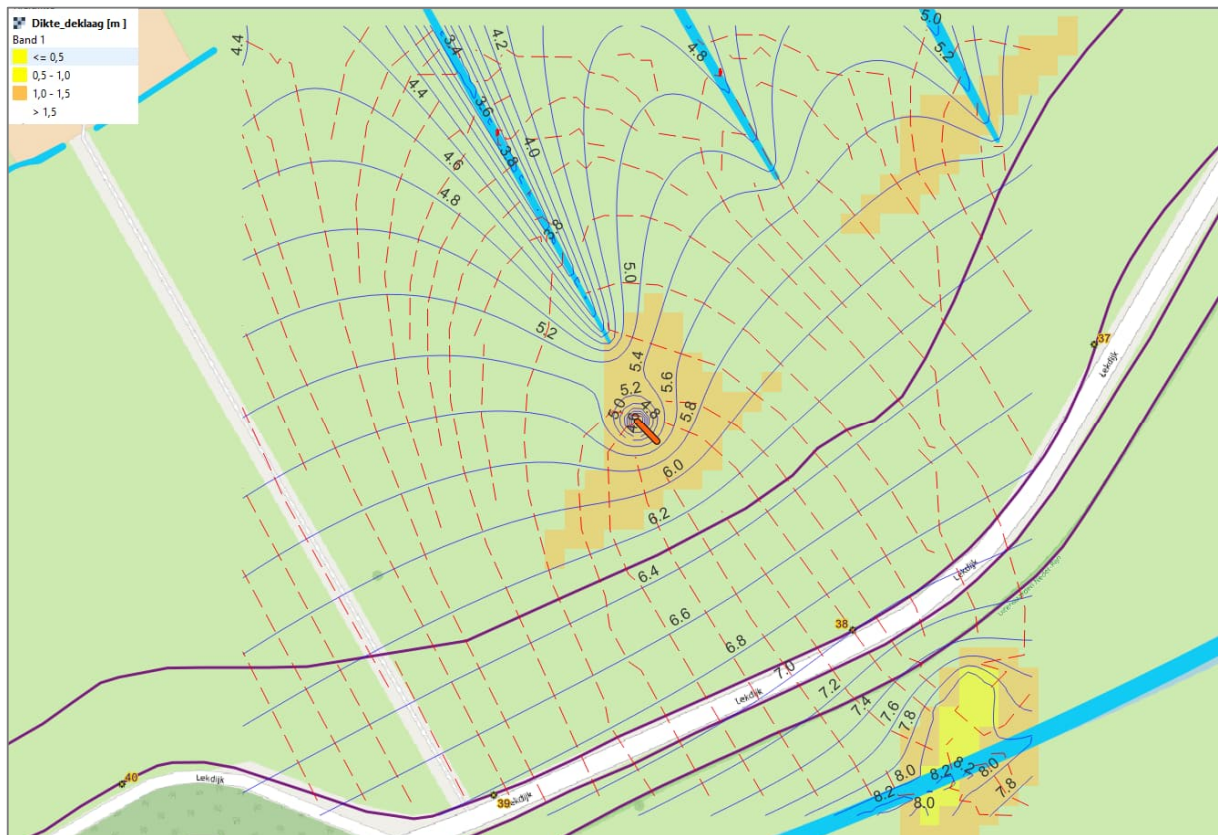
Bij het hoogwater eind januari 1995 is hier op 8 plekken in een (toen nog aanwezige serie kopsloten) een zandmeevoerende wel ontstaan. Hierbij is circa 7 m³ (fijn) zand door de pipes aangevoerd, dus circa 0.9 m³/wel. De maximale waterstand in de Nederrijn bedroeg bij dit hoogwater +8.1 [m NAP]. Op basis van de voor deze locatie gebruikte sondering (CPT000000111656_IMBRO) zou bij deze rivierwaterstand een theoretische pipelengte mogelijk zijn van 2.2 meter (figuur 5.1). Volgens de Monte_Carlo simulaties is er bij deze rivierstand geen piping-risico voor de dijk. Wel zijn er zandmeevoerende wellen.



Figuur 5.1 Berekende theoretische pipelengte Amerongen DP38

Net onder de deklaag, op circa +2 [m NAP] wordt de hoogste pipelengte berekend van 2.2 meter. Een hierbij horende doorsnede van de pipe (bij een uitgespoeld volume van 0.9 m³) is dan rekentechnisch circa 0.15 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 5.2



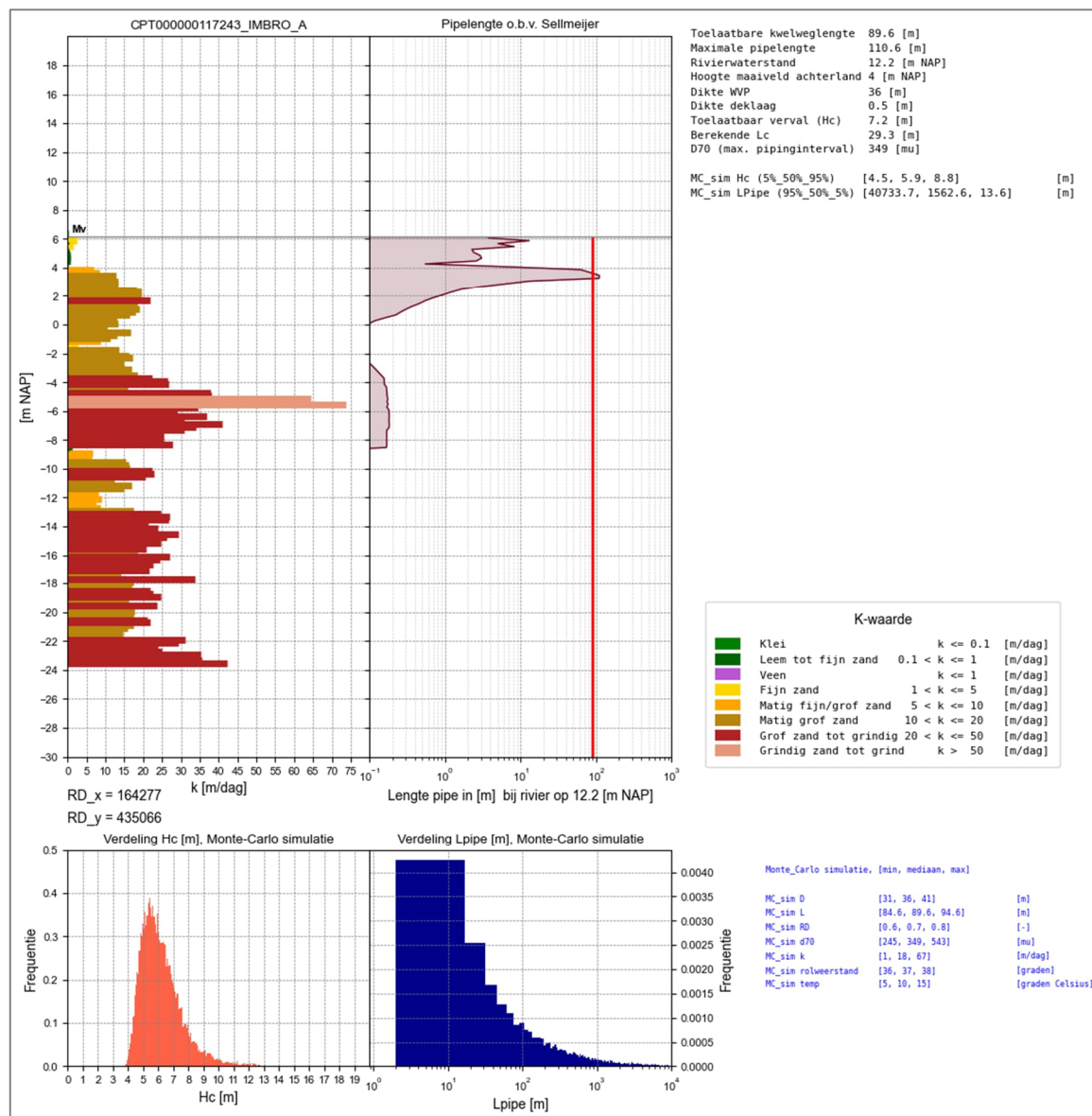
Figuur 5.2 Isohypsen op +2 [m NAP] bij hoogwater op de Nederrijn van +8.13 [m NAP]. Pipe met oranje lijn, isohypsen [m NAP] in blauw, stromingspatroon rood gestreept.

In bovenstaande figuur 5.2 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 5.1 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 5 [m] bij een minimale H_c van 3.5 [m] (95% waarden), ruim onder de beschikbare kwelweglengte van 80 [m].

5.2 Proeftuin IJzendoorn

Op deze locatie is veel gepubliceerd onderzoek gedaan naar het voorkomen en het ontstaan van de pipes ^{12,13,14} en de stabiliteit van dit dijkvak. In figuur 5.3 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 5.3 Interpretatie piping IJzendoorn

¹² Inpijn-Blokpoel, Pipingonderzoek dijkkring 43, Analyse pompproef proefvak 2, opdracht nr. 02P004885-adv-04, 18-05-2015

¹³ 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

¹⁴ Grontmij, Verbetering Waaldijken IJzendoorn-Tiel, augustus 1997

5.3 Proeftuin Tuil

Op deze locatie zijn in het verleden op een aantal plaatsen zand-meevoerende wellen aangetroffen tijdens hoogwater (bron: Stowa ¹⁵)

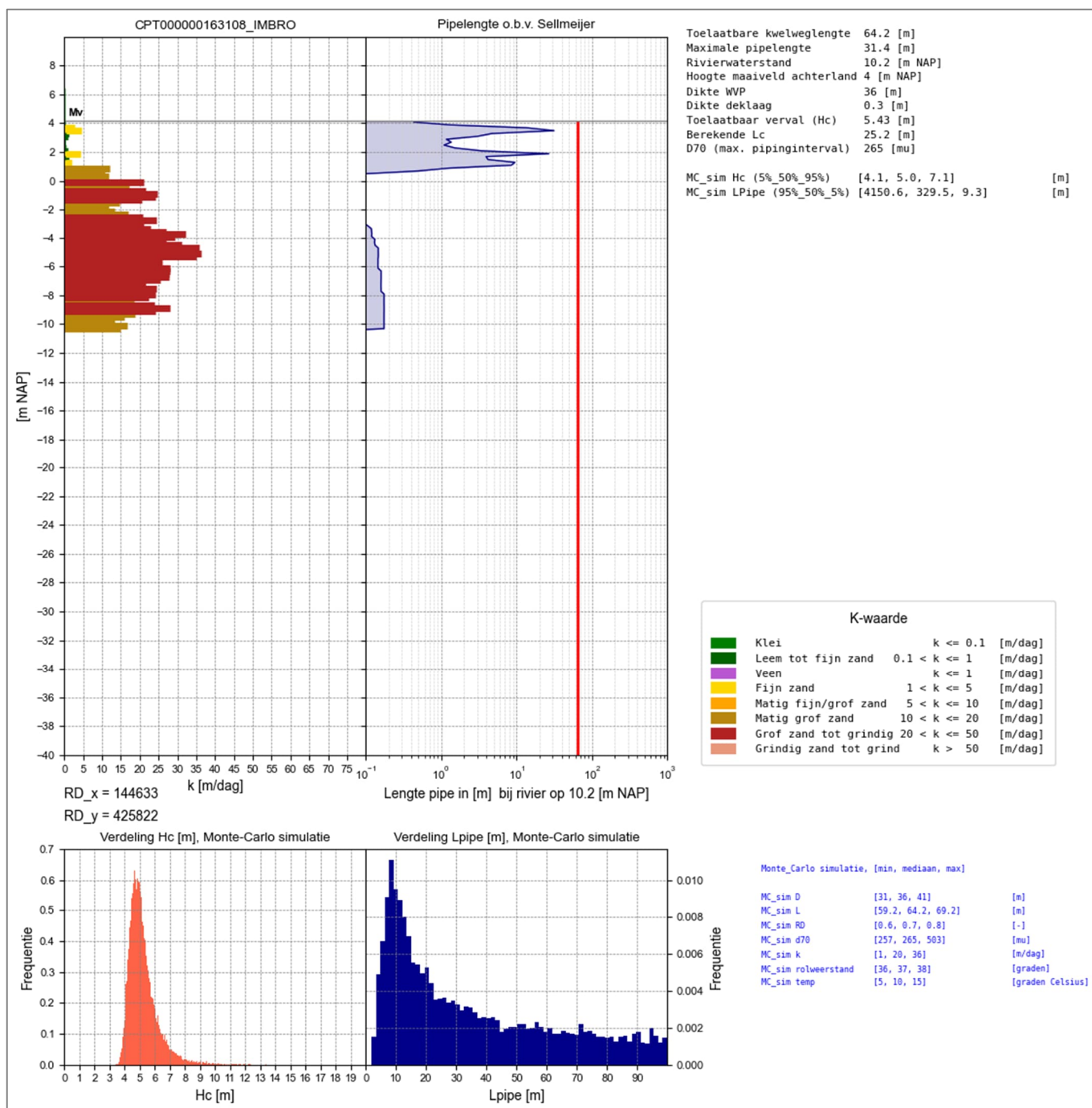


Figuur 5.4 Locatie bekende wellen (blauwe asteriks) Tuil

In figuur 5.5 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.

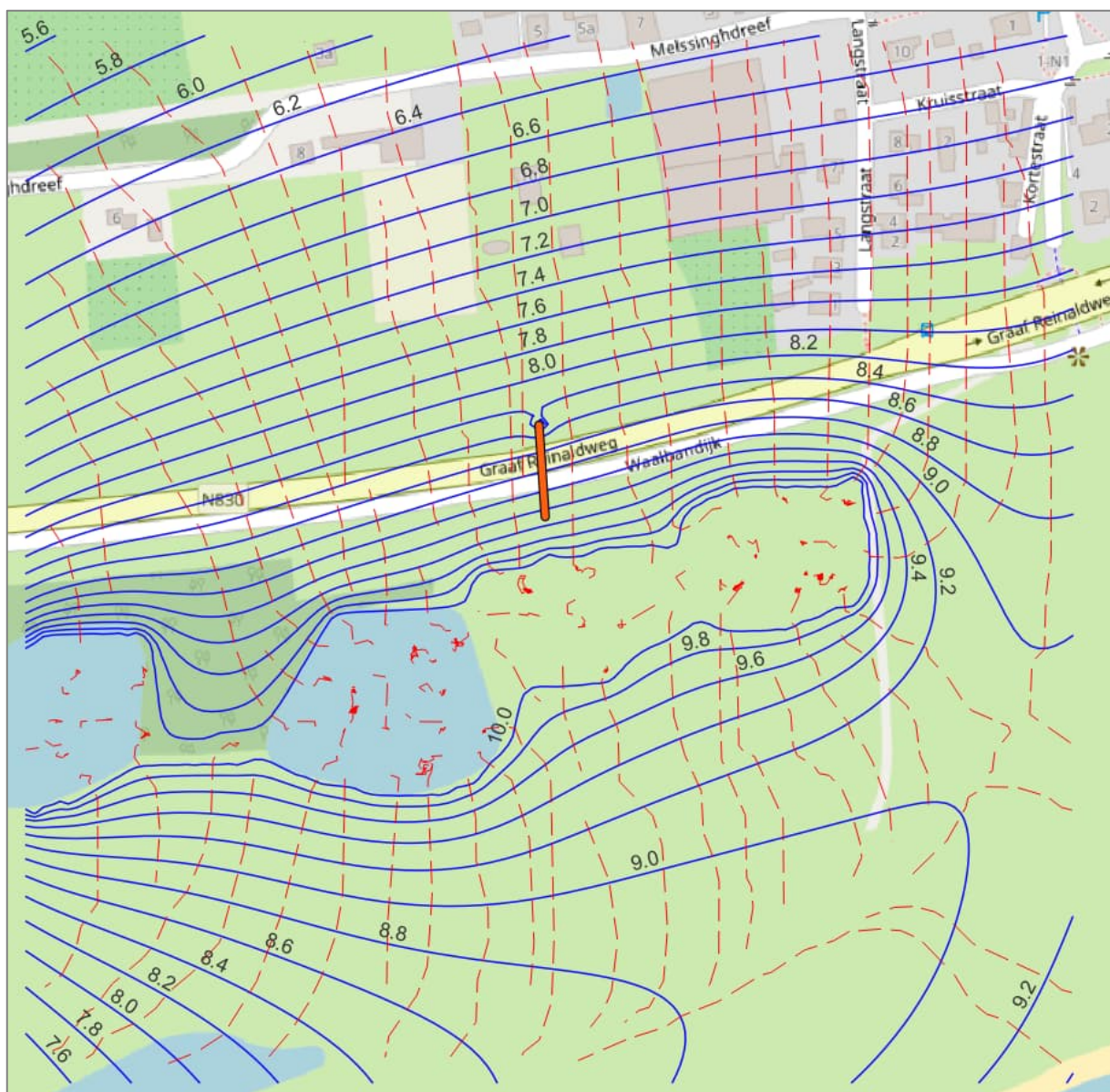
In de Monte-Carlo simulatie geeft 76% van de berekeningen een waarde boven de toegestane kwelweglengte.

¹⁵ [GIS Portaal Wellen \(wellocaties.app\)](#)



Figuur 5.5 Interpretatie pipe bij extreme rivierstand Tuil.

In figuur 5.6 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 5.6 Stromingspatroon bij hoogwater Tuil

