

Kwelwegberekening volgens NEN 3650 en NEN 3651 bij een horizontaal gestuurde boring



Gewogen Creep-factor (grondsoort afhankelijk)	Peilverschil	Lengte natuurlijke verticale kwelweg	Lengte natuurlijke horizontale kwelweg	Lengte alternatieve verticale kwelweg	Lengte alternatieve horizontale kwelweg	Weegfactor
C_v [-]	h [m]	ΣL_{vo} [-]	ΣL_{ho} [-]	ΣL_{vn} [-]	ΣL_{hn} [-]	α [-]

1. Inleiding

Wij krijgen veel vragen van gebruikers van het programma Sigma over de controle van de kwelweglengte. In deze memo wordt uitgebreid stilgestaan bij het ontstaan van de berekeningsmethode.

Tijdens de aanleg van een of meer leidingen met de horizontaal gestuurd boormethode (HDD), is er een potentieel risico op het optreden van kwel en op het optreden van piping. Dit risico blijft ook aanwezig na de aanleg van de leiding(en). In verband hiermee moet dus het optreden van kwel worden vermeden.

We hebben ook te maken met processen die de eigenschappen van de boorvloeistof in de boorgang veranderen, er kunnen ook hogere hydraulische belastingen optreden in de vorm van hoog water en hogere grondwaterdrukken. Ook hierdoor kan kwel optreden. Daarnaast is het van belang dat ook op langere termijn geen kwel gaat optreden door de aanwezigheid van de boring. In bijlage D van de NEN 3651:2020 is voorgeschreven hoe een kwelweglengte gecontroleerd moet worden.

2. Piping / kwel / kwelengte

In het onderzoeksrapport “Zandmeevoerende wellen” van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen ([link](#)) wordt uitgebreid beschreven wat de problemen zijn bij waterkeringen. Op de Helpdesk Water is in 2012 een rapport van Deltares gepubliceerd ([link](#)). In dit rapport lezen we de volgende definitie van piping:

Piping (ook onderloopsheid genoemd) is gedefinieerd als het ontstaan van holle ruimte onder een waterkering (dijk, dam of kunstwerk), ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd.

Onder de noemer **piping** vallen internationaal verschillende vormen van interne erosie. Deze hebben alle gemeen dat erosie door grondwaterstroming wordt veroorzaakt waardoor een of meer kanalen in het grondlichaam kunnen ontstaan. De kanalen kunnen uitgroeien en uiteindelijk een kortsluiting vormen tussen de waterstandkerende buitenzijde van de waterkering en het maaiveld of waterbodembodem aan de binnenzijde. Zodra er kortsluiting ontstaat, zal erosie van grond versneld plaatsvinden.

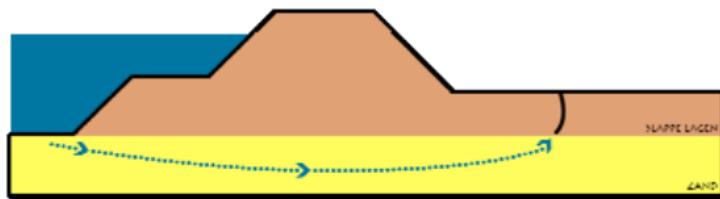
Een eerste voorwaarde voor piping is kwelstroming onder de dijk door. Het kwelwater treedt aan de binnenzijde van de dijk uit. Het debiet dat onder de dijk doorstroomt is afhankelijk van de dikte en de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag en het verval dat over de dijk heen staat.

Het debiet is hierbij lineair afhankelijk van het verval. Het type erosieproces, dat voor Nederlandse situaties als piping wordt aangeduid, is in Figuur 4.1 van het rapport van Deltares geschetst.

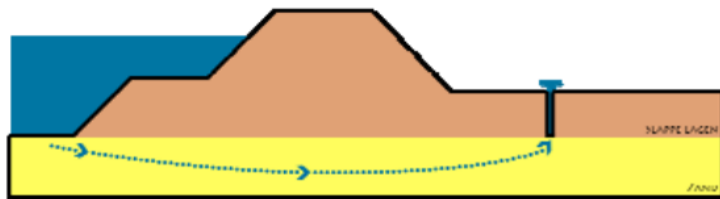
De hierin geschetste bodemopbouw is typisch voor veel in Nederland voorkomende dijken.

In figuur 4.1 is een dwarsdoorsnede van een dijk getekend. De bodemopbouw, gerekend vanaf het maaiveld naar beneden, bestaat uit een pakket van klei en/of veenlagen, ook wel de deklaag genoemd, gevolgd door een zandlaag.

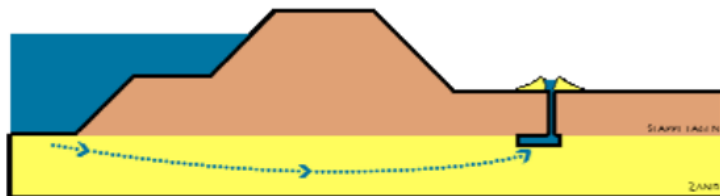
De deklaag is cohesief en relatief ondoorlatend (zowel in horizontale als in verticale richting). De eronder liggende zandlaag is relatief goed doorlatend; hierin zal doorgaans horizontale grondwaterstroming optreden. Deze laag wordt daarom ook de watervoerende zandlaag (watervoerend pakket) genoemd.



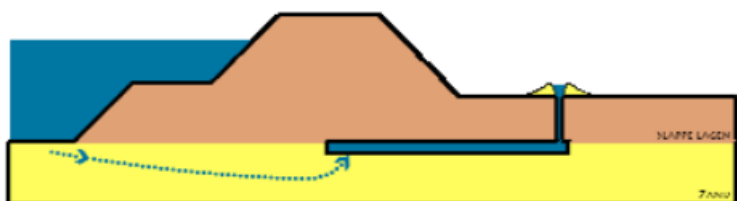
(a) opbarsten deklaag/heave



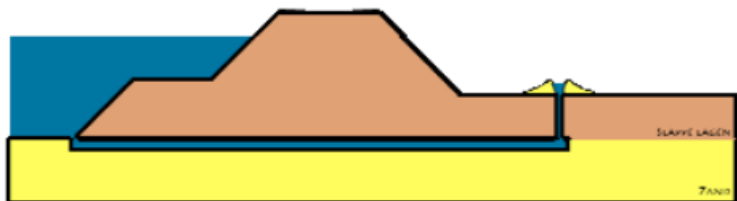
(b) kwel / welvorming, begin van erosie



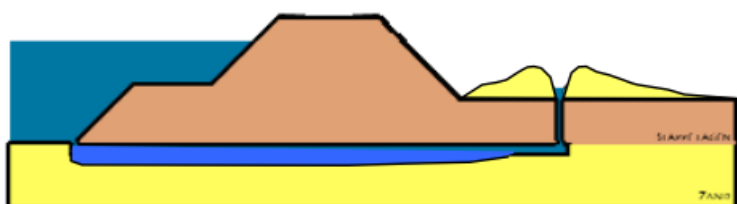
(c) beginnende pipe-vorming door terugschrijdende erosie



(d) pipe-vorming door terugschrijdende erosie



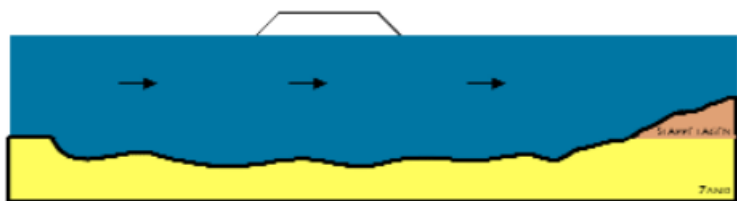
(e) doorgaande pipe / begin van ruimen (= mechanisme piping)



(f) ruimen (= verbreding van de pipe)



(g) bezwijken van de dijk

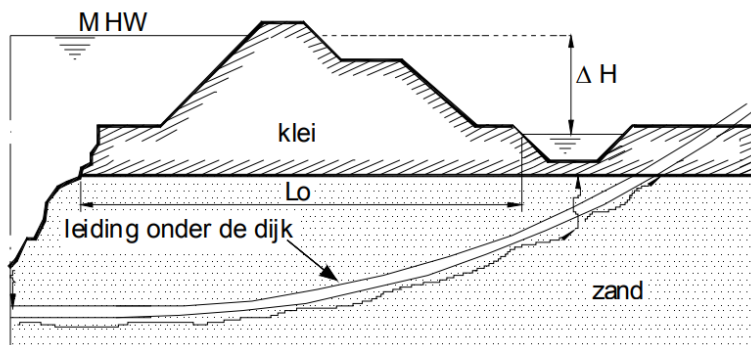


(h) dijkdorbraak

Figuur 4.1 Verschillende fasen bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie van de ondergrondopbouw bij een dijk (Deltares)

3. Controle kwelweg bij horizontaal gestuurde boringen

Bij een horizontaal gestuurde boring moet gecontroleerd worden of er sprake is van een verkorting van de kwelweg in vergelijking met de ongestoorde (dus zonder pijpleiding) situatie. In de NPR 3659 en de NEN 3651 is de berekeningsmethode van Lane voorgeschreven.



Figuur 8.8 Diep gelegen leidingkruising (Deltares)

Door Lane is in 1935 een berekeningsmethode van Bligh geanalyseerd op basis van bezwijkgevallen van constructies (stuwdammen) waarbij de kwelweg gedeeltelijk uit verticale stukken bestond de volgende rekenregel opgesteld:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{\left(\frac{1}{3}L_h + L_v\right)}{C_{w,creep}}$$

Hierin is L_h de totale lengte van de horizontale delen van de kwelweg en L_v de totale lengte van de verticale delen van de kwelweg, de zogenaamde "line of creep". Simpel gezegd, het water "kruipt" door de waterkering.

Het verval ΔH is gelijk aan het verschil tussen buitenwaterstand (het ontwerppeil (OP) bij zeedijken en de maatgevende hoogwaterstand (MHW) bij rivierdijken) en de waterstand binnendijks ter plaatse van het uittredepunt, rekening houdend met zeespiegelrijzing et cetera.

Indien ter plaatse van het uittredepunt of de opbarstlocatie geen vrije waterstand heerst, kan gerekend worden met het maaiveldniveau, rekening houdend met eventuele maaiveld daling.

De factor $C_{w,creep}$ is dus een materiaalconstante en wordt de gewogen creep-factor genoemd.

In de NEN 3651:2020 zien we de volgende waarden voor $C_{w,creep}$:

Grondsoort	$C_L (= C_{w,creep})$
Zeer fijn zand of slib	8,5
Fijn zand	7,0
Grof zand	5,0
Fijn grind	4,0
Grof grind met stenen	3,0
Zachte klei	3,0
Harde klei	1,8
Veen	6,0 (aanname)

Deze waarden zijn in Nederland al jaren “in gebruik”. Bij veen zien we 6,0 staan. Dat heeft te maken met de horizontale gelaagdheid van veen waardoor C_L feitelijk vergelijkbaar is met fijn en grof zand.

In deel I van het compendium Geo-Tubomechanica (uitgegeven door de provincie Zuid-Holland) zien we de volgende tabel:

$C_{L(ane)}$ is een 'gewogen gradiënt' en kan als volgt worden aangenomen.		
zeer fijn zand of slib:	$C_L =$	8,5
fijn zand	:	= 7
grof zand	:	= 5
fijn grind	:	= 4
grof grind met stenen	:	= 3
zachte klei	:	= 3
harde klei	:	= 1,8

Deze tabel werd destijds gebruikt om de kwelweg bij kunstwerken te berekenen. Dus niet voor het berekenen van een kwelweg van een horizontaal gestuurde boring. Op het moment van publiceren van het compendium was een HDD onbekend in Nederland.

We kunnen echter wel concluderen dat de C_L -factoren die nu in de NEN 3650:2020 vermeld staan al heel wat jaren worden toegepast.

Zowel Bligh als Lane hadden hun “eigen” creep-factoren:

Material	Lane's safe weighted-creep ratio	Bligh's value
Very fine sand or silt	8.5	18
Fine sand	7.0	15
Medium sand	6.0	--
Coarse sand	5.0	12
Fine gravel	4.0	--
Medium gravel	3.5	--
Gravel and sand	--	9
Coarse gravels including cobble	3.0	--
Boulders with some cobbles and gravels	2.5	--
Boulders, gravel and sand	--	4 to 6
Soft clay	3.0	--
Medium clay	2.0	--
Hard clay	1.8	--
Very hard clay or hard pan	1.6	--

Bligh publiceerde dus eerder dan Lane een berekeningsmethode om een kwelweglengte te berekenen. In de praktijk is echter gebleken dat de methode Lane betrouwbaardere resultaten gaven. Vandaar dus dat deze methode voor horizontaal gestuurde boringen is voorgeschreven.

De kans op het optreden van piping op lange termijn kan worden beoordeeld door de potentiële kwelwegen te onderzoeken. Naast de natuurlijke kwelwegen zijn er na de uitvoering van de horizontaal gestuurde boring ook potentiële kwelwegen langs de boorgang.

De kritische kwelweglengte moet worden berekend en worden vergeleken met de aanwezige natuurlijke kwelweglengte. Dit om er zeker van te zijn dat de stroomsnelheid langs een potentiële kwelweg niet te hoog kan worden, zodat er piping optreedt. Ook moet de kwelweg langs een boorgang kleiner zijn dan de kritische kwelweglengte.

Voor de kwelwegen langs de boorgang kunnen de volgende typen worden onderscheiden:

- van binnendijks naar buitendijks;
- van binnendijks naar binnendijks;
- van buitendijks naar buitendijks.

Bij de kwelweg van binnendijks naar buitendijks kan onderscheid worden gemaakt tussen de situatie (A) waarbij open water aanwezig is bij het in- of uittrede punt, of een situatie (B) waarbij dat niet direct het geval is (bij uiterwaarden).

Bij een boring van binnendijks naar binnendijks moet rekening worden gehouden met de verschillende peilgebieden. Verschil in waterstanden kan een kwelstroming op gang brengen.

Bij een boring van buitendijks naar buitendijks gebied kunnen afsluitende lagen worden doorsneden (hier moet aandacht aan worden besteed) maar kan er geen kwel langs de boorgang optreden.

Doordat een boorgat afsluitende toplagen kan doorsnijden bij boringen in kwelgebieden is een beoordeling van kwel, ook in situaties zonder waterkeringen, relevant. Kwel vanuit een dieper gelegen watervoerende laag met een hogere stijghoogte dan de freatische grondwaterstand kan optreden als ter plaatse van het boorgat de verbinding met de afsluitende grondlagen niet wordt gerealiseerd.

De weerstand tegen kwelstroming in de boorgang kan afhankelijk van de omstandigheden afwijken van de weerstand van de omringende grond. Factoren die de weerstand bepalen zijn:

- a) aanwezigheid van zout grondwater;
- b) het effectieve gewicht van de leiding in boorgat;
- c) een of meerdere leidingen in boorgat;
- d) doorlatendheid van de omringende grond;
- e) afstand tussen de boorgang en bovengelegen open water;
- f) de toepassing van een uithardende, plastische blijvende en afsluitende boorvloeistof.

Al deze factoren moeten in kwelweglengte beschouwing worden meegenomen.

Het onderzoek naar mogelijke kwel bestaat uit twee controles.

De 1^e controle wordt “Absolute toetsing” genoemd. Hierbij wordt gekeken naar het verschil tussen de buitenwaterstand en de binnenwaterstand (bijvoorbeeld waterpeil of grondwaterstand). Bij deze toetsing wordt naar de nieuwe situatie gekeken, dus wanneer de HDD op zijn plek ligt.

Bij de 2^e controle wordt gekeken naar het mogelijk ontstaan van “interne erosie” als gevolg van de HDD. Deze controle wordt de “Relatieve toetsing” genoemd. Er moet dan worden gecontroleerd of de natuurlijke kwelweg korter is dan de alternatieve kwelweg langs de boring.

1^e controle (Absolute toetsing)

Volgens Lane kan de kortste kwelweglengte als volgt worden berekend en gecontroleerd op materiaaltransport onder de dijk door:

$$\Sigma L_v + \Sigma 1/3 \times L_h \geq C_L \times h$$

Hierin is:

- L_v is de benodigde kwelweglengte in verticale richting (helling $\geq 45^\circ$ tot en met 90°) [m]
- $1/3$ is de weegfactor volgens Lane omdat verticale grensvlakken meer hydraulische weerstand bieden dan horizontale grensvlakken [-]
- L_h is de benodigde kwelweglengte in horizontale richting (helling $> 0^\circ$ tot en met 45°) [m]
- C_L is een grondsoortafhankelijke factor, die zowel de doorlatendheid als de bestandheid tegen erosie (korrelgrootte of cohesie) representeert [-]
- h is het verval (verschil tussen ontwerppeil en polderpeil) over de waterkering [m]

Het linkerdeel van de vergelijking betreft de lengte van de HDD ter plaatse van de te kruisen waterkering. De uitkomst van deze berekening wordt vergeleken met het rechterdeel van deze vergelijking, de lengte van de kwelweg die aanwezig is, dus de bestaande situatie.

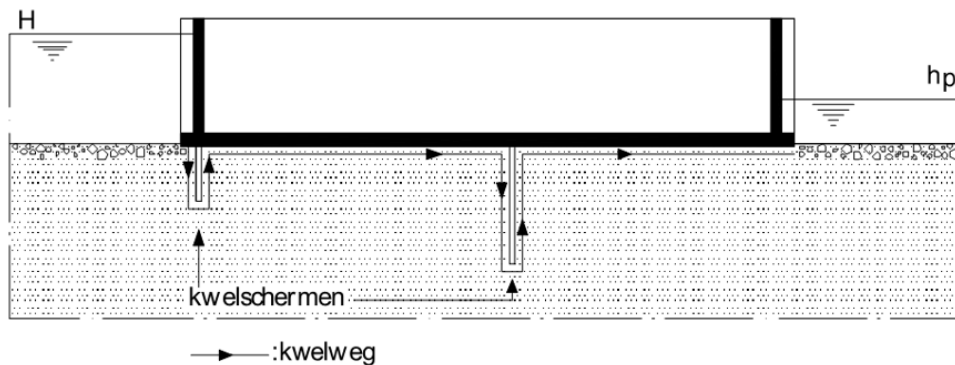
HDD	Bestaande situatie
$\Sigma L_v + \Sigma 1/3 \times L_h$	$C_L \times h$

Wanneer de som van het linkerdeel groter of gelijk is aan de uitkomst van het rechterdeel is geen risico op kwel.

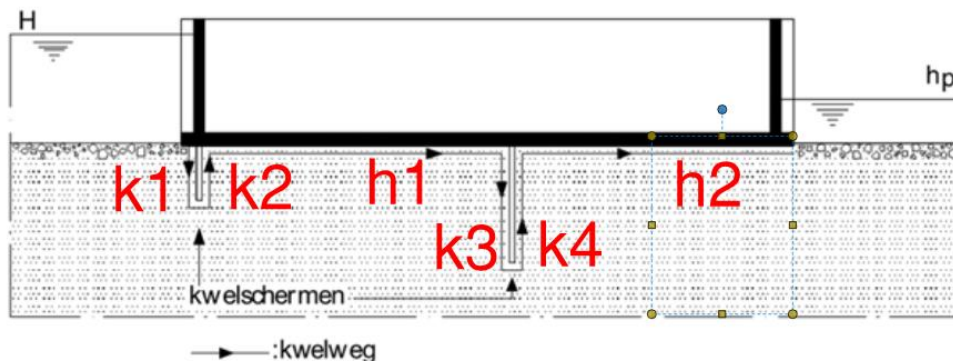
Kijken we naar het linkerdeel van de vergelijking dan zien we:

$$\Sigma L_v + \Sigma 1/3 \times L_h$$

Dus de sommatie van de verticale delen + de som van $1/3^e$ x de lengte van de horizontale delen.
Neem bijvoorbeeld een kunstwerk met aan de linkerzijde hoog water en aan de rechterzijde laag water dan zien we:



De totale lengte is uit te rekenen. De verticale route bestaat uit vier lengtes langs de kwelschermen en de horizontale lengte bestaat uit twee lengtes onder de vloer door.



Stel $k1 = k2 = 3$ m en $k3 = k4 = 8$ m met $h1 = 20$ m en $h2 = 16$ m dan krijgen we:

$$\sum L_v = k1 + k2 + k3 + k4 = 3 \text{ m} + 3 \text{ m} + 8 \text{ m} + 8 \text{ m} = 22 \text{ m}$$

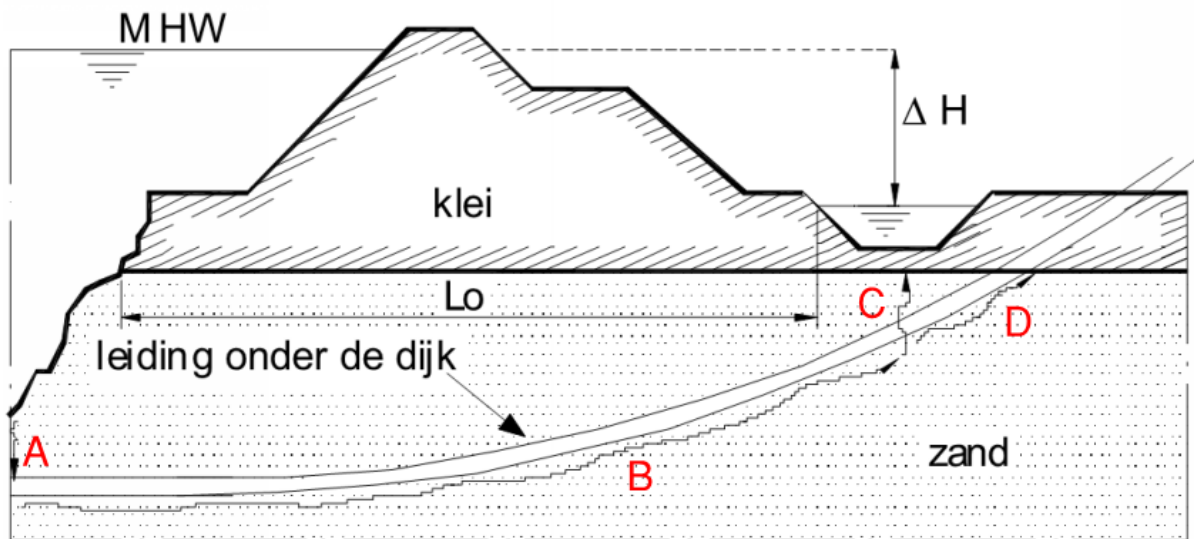
$$\sum L_h = 1/3 \times (h1 + h2) = 1/3 \times (20 \text{ m} + 16 \text{ m}) = 1/3 \times 36 \text{ m} = 12 \text{ m}.$$

De totale lengte is dan $22 \text{ m} + 12 \text{ m} = 34 \text{ m}$.

Bij een $\Delta H (= h)$ is van 4,5 m krijgen we bij een C_L van 1,8: $1,8 \times 4,5 \text{ m} = 8,1 \text{ m}$ (dus geen risico op kwel want 8,1 m is veel kleiner dan 34 m). Bij een C_L van 8,5 krijgen we $8,5 \times 4,5 \text{ m} = 38,25 \text{ m}$.

In dat geval is er mogelijk wel kans op kwel want de kwelweg onderlangs is nu 4,25 m korter dan de "bestaande" kwelweg.

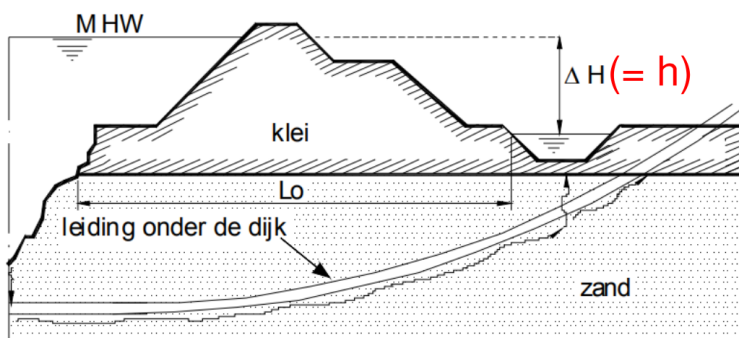
Het is in dat geval verstandig om te kiezen voor langere kwelschermen.



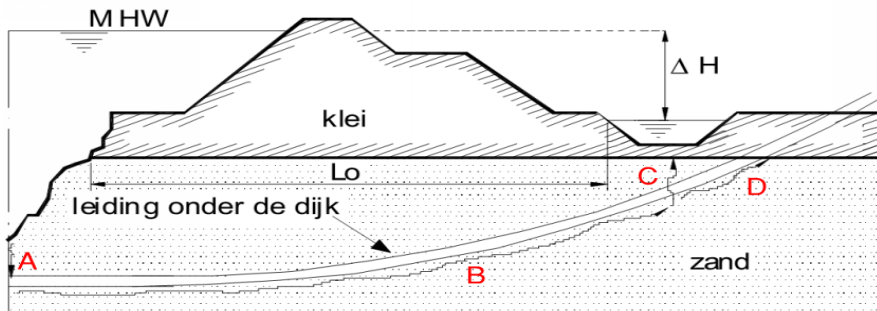
Lengte HDD ter plaatse van de dijk

Volgens de NEN 3651:2020 is L_v van toepassing bij hellingen steiler dan 45° en L_h voor hellingen flauwer dan 45° . Dit betekent dus dat voor de absolute toetsing de lengte van de HDD ter plaatse van de waterkering kan worden aangehouden (het tussen A en C gelegen deel B) en voor de verticale lengte (lengte A + lengte C).

Geven de het rechterdeel van de vergelijking schematisch weer dan zien we:

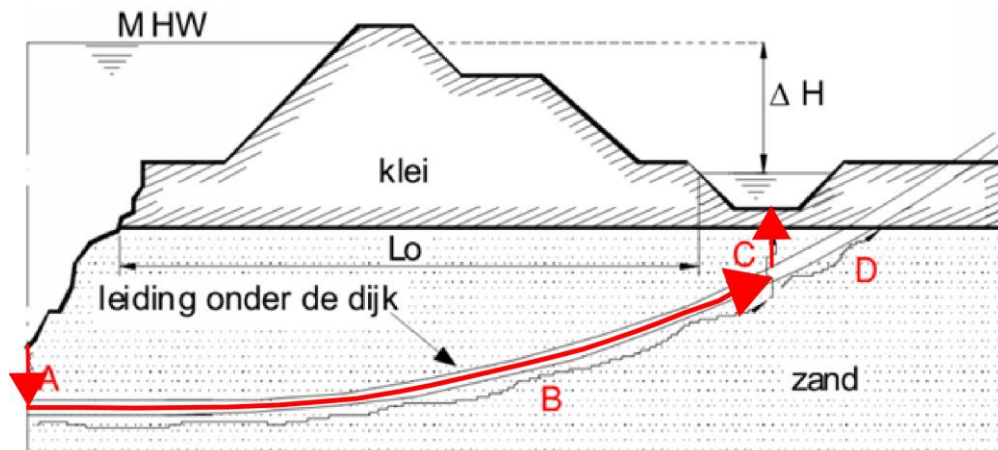


Dus h is gelijk aan het niveauverschil tussen de maatgevende hoogwaterstand en het peil in de watergang (of als die er niet is de grondwaterstand). Indien de grondwaterstand zeer laag is dan wordt vaak het maaiveldniveau aangehouden. Dit hoogteverschil x de CL-waarde varieert dus van 1,8 (harde klei) tot 8,5 (zeer fijn zand of slib). De lengte van de HDD doet er dus niet toe.

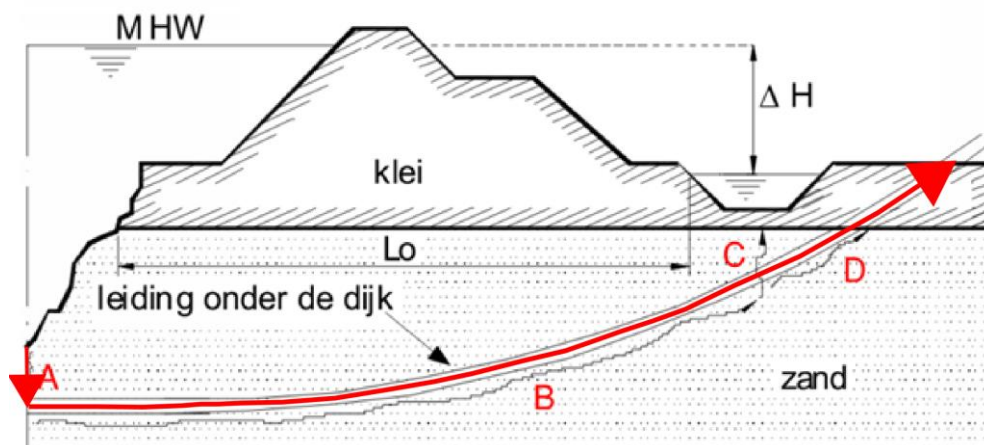


Kijken we naar de HDD dan zien we twee verticale kwelwegen, namelijk deel A en deel C en twee “horizontale” kwelwegen, namelijk deel B en deel D.

Wordt de kwel beschouwd ter plaatse van de bodem van de bermsloot dan wordt dit beschouwd:



Indien de kwelweg richting het maaiveld in het lager gelegen gebied wordt beschouwd dan krijgen we de volgende “kwellengte”:



De kwellengte bestaat nu uit $A + B + D$.

2^e controle (Relatieve toetsing)

Voor controle op interne erosie bij gestuurde horizontale boringen geldt de eis dat de minimale diepteligging van de boorgang onder de waterkering zo gekozen moet worden dat de kortste natuurlijke kwelweglengte door of onder de waterkering korter is dan de alternatieve kwelweglengten langs de boorgang:

$$\Sigma L_{v0} + \Sigma 1/3 L_{h0} \leq \Sigma L_{vn} + \Sigma \alpha L_{hn}$$

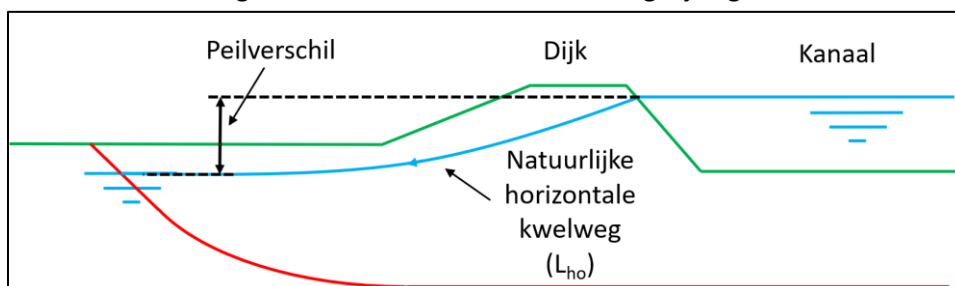
waarin:

- L_{v0} en L_{h0} zijn de kortste natuurlijke horizontale en verticale kwelweglengten, in m;
- L_{vn} en L_{hn} zijn de alternatieve kwelweglengten, in m;
- α is een weegfactor liggend tussen 0 en 1/3.

Bij een gelaagde structuur van de ondergrond wordt de C_L -waarde bepaald door de grondsoort op het punt van uittrede van de kwelstroom (bestandheid tegen erosie).

De L_v - en L_h -waarden in andere grondsoorten worden naar verhouding van de doorlatendheden omgerekend naar equivalente lengten met de maatgevende grondsoort (hydraulische weerstand).

Schematische weergave van het linkerdeel van de vergelijking:



De lengte L_{h0} kan vanaf de boortekening worden opgemeten.

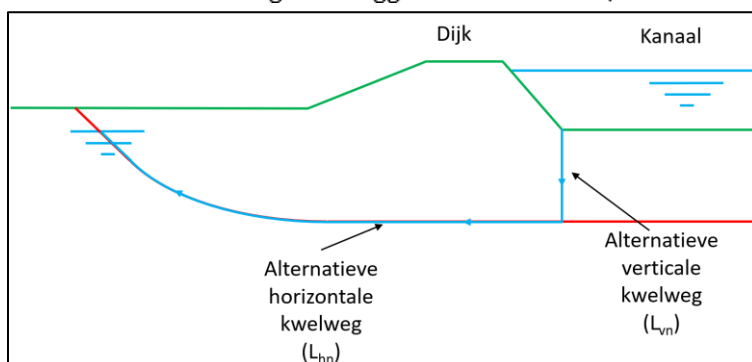
Het kanaalpeil bij boezemkanalen of de maatgevende hoogwaterstand – minus de grondwaterstand, het slootpeil of de maaiveldhoogte (indien sprake is van een lage grondwaterstand en/of een watergang ter plaatse ontbreekt).

Schematische weergave van het rechterdeel van de vergelijking:

$$\Sigma L_{vo} + \Sigma 1/3 L_{ho} \leq \Sigma L_{vn} + \Sigma \alpha L_{hn}$$

waarin:

- L_{vo} en L_{ho} zijn de kortste natuurlijke horizontale en verticale kwelweglengten, in m;
- L_{vn} en L_{hn} zijn de alternatieve kwelweglengten, in m;
- α is een weegfactor liggend tussen 0 en 1/3.



Zoals bij de absolute toets is uitgelegd hebben we het bij een HDD eigenlijk over de lengte van de boring ter plaatse van de waterkering en het verticale deel vanaf de bodem van het kanaal of de rivier. Bij deze vergelijking zien we dus:

$$\boxed{\Sigma L_{vo} + \Sigma 1/3 L_{ho}} \leq \boxed{\Sigma L_{vn} + \Sigma \alpha L_{hn}} \quad \text{HDD}$$

In het rechterdeel van de vergelijking wordt de horizontale lengte van de HDD vermenigvuldigd met factor α . Deze factor geeft de orde van grootte van de weerstand in de boorgang weer, de zogenaamde weegfactor.

Volgens de NEN 3651:2020 varieert deze factor van 0 tot 1/3:

De weegfactor 1/3 geldt alleen als er sprake is van een horizontaal grensvlak, bijvoorbeeld twee grondlagen. Voor het contactvlak grond-bentoniet in de boorgang ligt de weegfactor tussen 0 en 1/3 (onzekerheidsinterval).

Fragment uit NEN 3651:2020

In de NPR 3659 zijn diverse voorbeelden uitgewerkt van zowel rivierwaterkruisingen als boezemwaterkruisingen. Deze berekeningen zijn destijds gemaakt door de provincie Zuid-Holland.

Type waterkering/grondslag	Weegfactor(en)
Rivierwaterkering	
Ondergrond doorlatender dan de dijk (klei op zand)	$\frac{1}{6}$
Ondergrond even doorlatend als de dijk (klei op klei of zand op zand)	$\frac{1}{6}$
Ondergrond minder doorlatend dan de dijk (zand op klei)	$\frac{1}{6}$
Ondergrond minder doorlatend dan de dijk (zand op veen)	$\frac{1}{10}$ of $\frac{1}{5}$ (veen)
Boezemwaterkering annex kaden	
Ondergrond en kade even doorlatend (beide veen)	$\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$
Ondergrond en kade even doorlatend (beide klei)	$\frac{1}{6}$
Ondergrond doorlatender dan de kade (klei op veen)	$\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$ en $\frac{1}{2}$ aan de basis (veen)
Ondergrond minder doorlatend dan de kade (veen op klei)	$\frac{1}{2}$

Weegfactoren volgens de NPR 3659

De factor 0,1 (dus $\frac{1}{10}$) komt slechts een keer voor. De factor $\frac{1}{6}$ (dus 0,167) komt het meest voor.

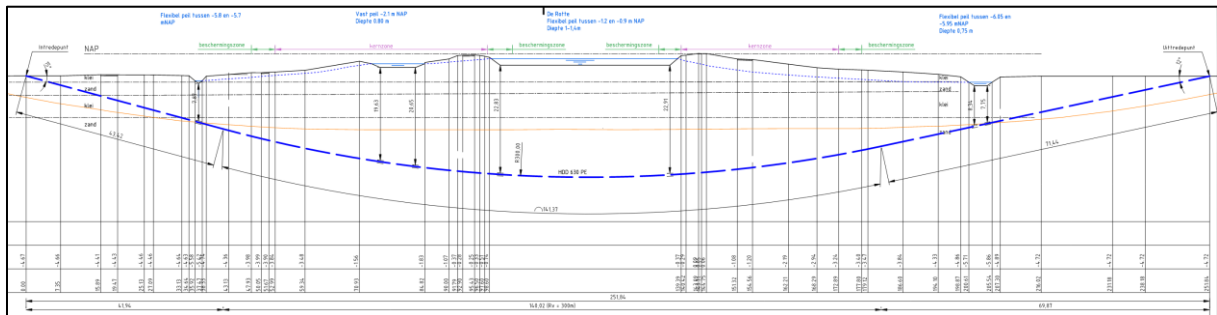
De factor $\frac{1}{3}$ (= 0,33) zien we niet vermeld. Gelet hierop lijkt het logisch om $\frac{1}{6}$ als standaardwaarde te kiezen bij het maken van de kwelwegberekeningen (zit dus tussen $\frac{1}{10}$ en $\frac{1}{3}$ in).

De gebruiker van het programma Sigma kan door zelf met deze waarde te variëren kijken wat voor een effect het heeft op het eindresultaat. Bovenstaande tabel met de weegfactoren/beschrijvingen van de waterkeringen is daarvoor een goede richtlijn.

4. Rekenvoorbeeld

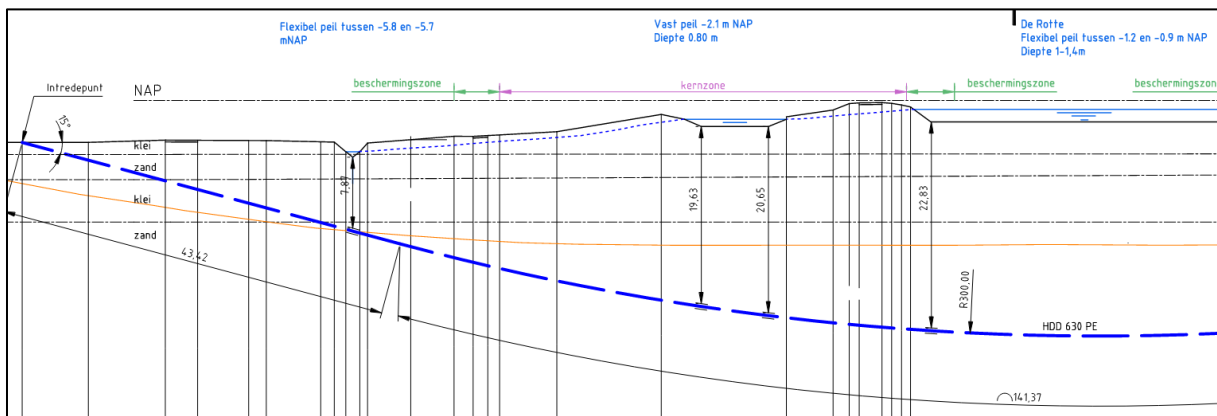
Kruising met boezemkade

Bij een HDD ter plaatse van een boezemkade kunnen we het risico op kwel berekenen.



Voorbeeld kruising boezemkade

Wanneer we van deze boring de situatie nabij het intrredepunt bekijken zien we:



Intrredepunt – hart Boezemkanaal

Enige uitgangspunten:

Boezempeil = maximaal NAP +0,9 m

Polderpeil nabij intrredepunt = minimaal NAP -5,8 m

Dit betekent een peilverschil boezemwater-polderwater van maximaal 6,7 m.

Dus we hebben hier $\Delta h = 6,7$ m

De kwelwegberekening bestaat uit twee toetsingen. De absolute toetsing en de relatieve toetsing. Zoals in deze memo is toegelicht is het voor de absolute toetsing nodig om een lengte van de horizontale kwelweg te bepalen.

Invoer in programma Sigma:

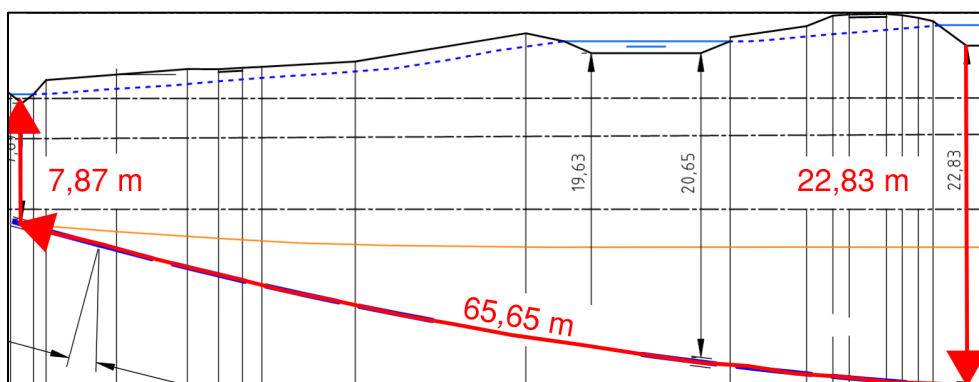
Invoergegevens kwelwegen							
Locatie	Gewogen Creep-factor (grondsoort afhankelijk) C_L [m]	Peilverschil h [m]	Lengte natuurlijke verticale kwelweg L_{vo} [m]	Lengte natuurlijke horizontale kwelweg L_{ho} [m]	Lengte alternatieve verticale kwelweg L_{vn} [m]	Lengte alternatieve horizontale kwelweg L_{hn} [m]	Weegfactor α [-]
1) De Rottte--..	3	6,7	0	61,4	30,7	65,65	1/6

Absolute toetsing

Kijken we naar de formule van de **absolute toetsing** dan zien we:

$$\text{HDD} \quad \Sigma L_v + \Sigma 1/3 \times L_h \geq \text{Bestaande situatie} \quad C_L \times h$$

Formule absolute toetsing



Gedeelte boezemkanaal-poldersloot (intredepunt-zijde)

Linkerdeel van de vergelijking:

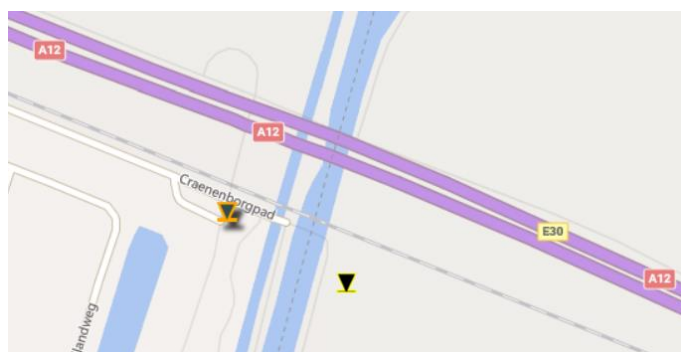
De lengte van de HDD tussen boezemkanaal en poldersloot bedraagt 65,65 m. We zien twee verticale delen, namelijk 22,83 m en 7,87 m. Bij elkaar is dit 30,7 m. Horizontaal krijgen we $1/3 \times 65,65 \text{ m} = 21,88 \text{ m}$. De totale lengte wordt dus $30,7 \text{ m} + 21,88 \text{ m} = 52,58 \text{ m}$.

Deze uitkomst moet vergeleken worden met $C_L \times h$.

Grondsoort	$C_L (= C_{w,creep})$
Zeer fijn zand of slib	8,5
Fijn zand	7,0
Grof zand	5,0
Fijn grind	4,0
Grof grind met stenen	3,0
Zachte klei	3,0
Harde klei	1,8
Veen	6,0 (aanname)

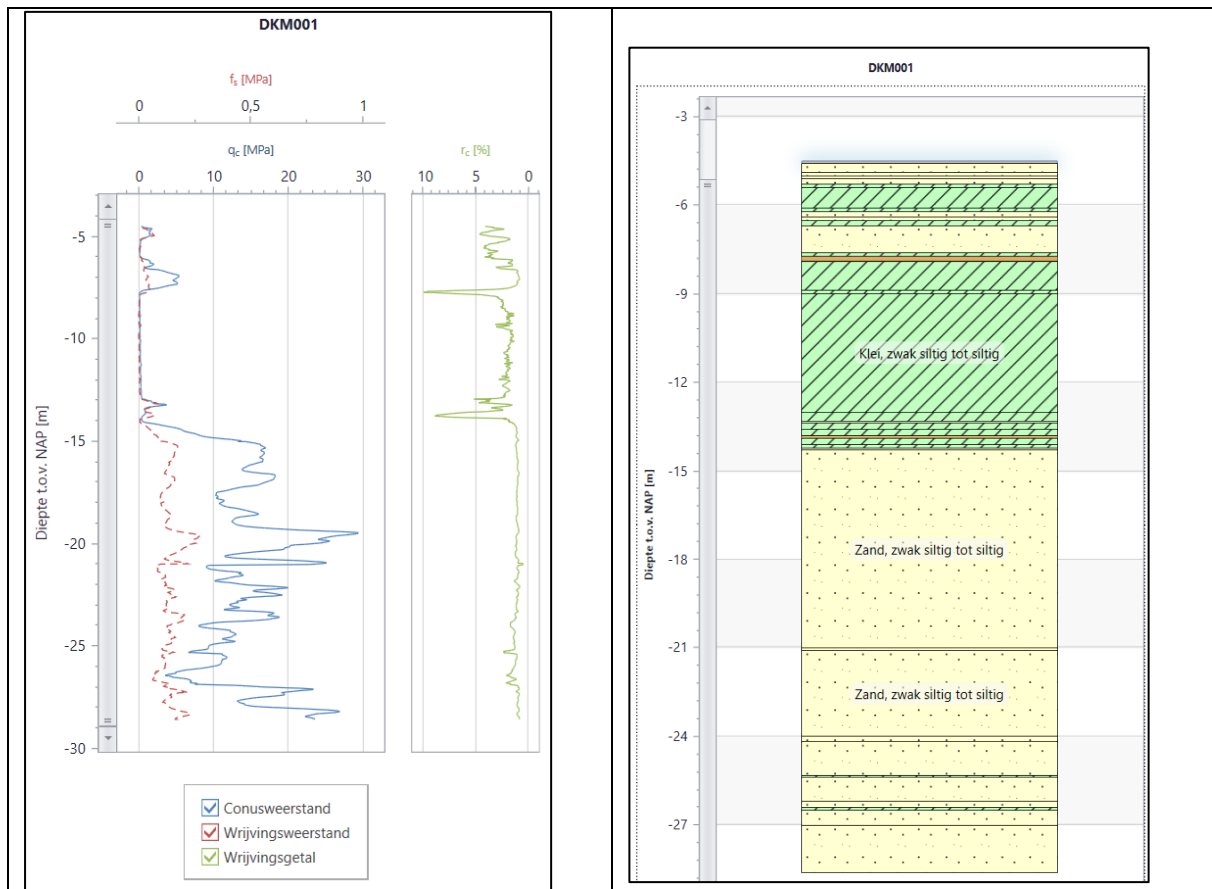
Tabel met C_L -waarden (NEN 3651:2020)

Wanneer sprake is van fijn zand dan is C_L gelijk aan 7,0. Bij zachte klei is C_L gelijk aan 3,0. Voor dit project zijn twee sonderingen gemaakt. Deze moeten we dus gebruiken om de C_L vast te kunnen stellen.



Sonderingen t.b.v. de HDD

Bij het intredepunt is sondering DKM1 gemaakt.



Vertaling sondering DKM1 naar grondprofiel

Hier is dus sprake van klei op zand. Het zand begint op circa NAP -14,2 m. Daarboven is het vooral zand.

De kruinhoogte van de waterkering bedraagt NAP -0,25 m. De bovenzijde van de sondering is NAP -4,51 m.

Omdat het een boezemkade met een flauw aflopend talud betreft is het aannemelijk dat het matig tot slappe klei betreft met mogelijk wat veen. We hebben dus duidelijk met klei te maken, dus $C_L = 3,0$.

Uitgaande van $\Delta h = 6,7$ m volgt $C_L \times h = 3,0 \times 6,7 = 20,1$ m.

Wanneer we dit met Sigma berekenen dan zien we:

1) De Rottte—>Poldersloot (Absolute toetsing) :

$$\Sigma L_v = 30,7 \text{ m}$$

$$\Sigma L_h = 65,65 \text{ m}$$

$$C_L = 3$$

$$h = 6,7 \text{ m}$$

$$\Sigma L_v + \Sigma 1/3 \cdot L_h \geq C_L \cdot h$$

$$30,7 + 1/3 \cdot 65,65 \geq 3 \cdot 6,7$$

$$52,58 \geq 20,10 \rightarrow \text{Voldoet}$$

Resultaat berekening programma Sigma

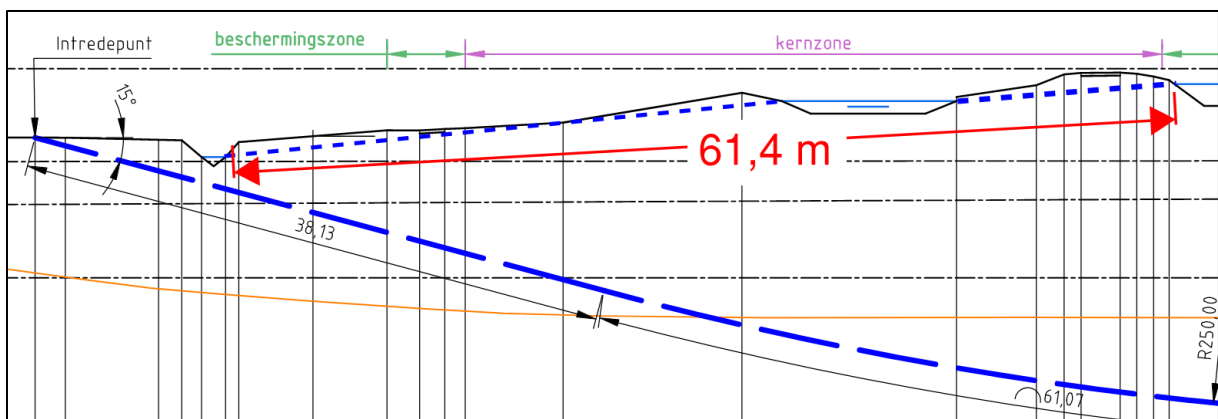
Conclusie met betrekking tot de absolute toetsing: Voldoet

Relatieve toetsing

De 2^e toets is dus de **relatieve toetsing**.

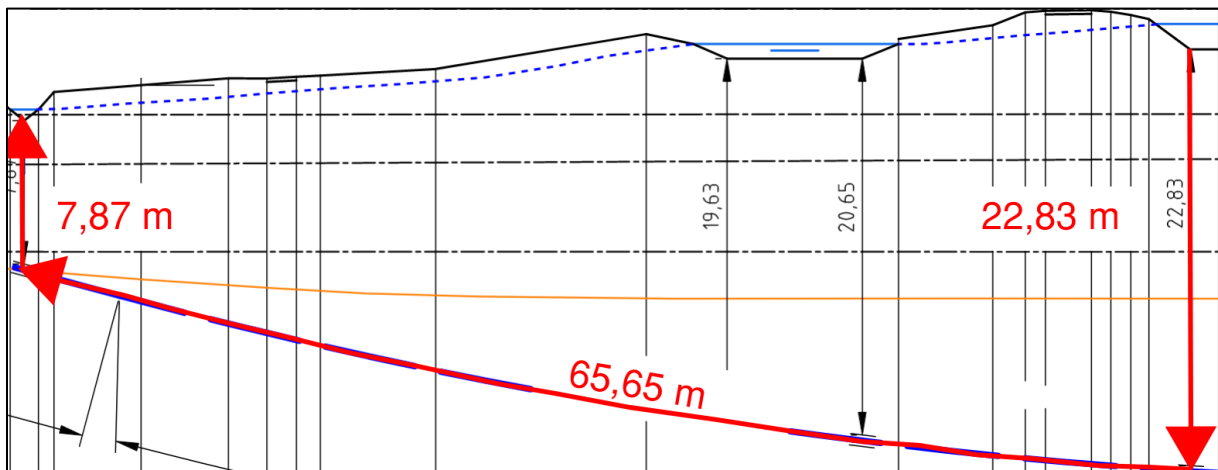
Bestaande situatie $\Sigma L_{vo} + \Sigma 1/3 L_{ho} \leq$	HDD $\Sigma L_{vn} + \Sigma \alpha L_{hn}$
--	---

Kijken we naar het linkerdeel van deze vergelijking dan zien we dus een natuurlijke kwelweg van 61,4 m:



Lengte is 61,4 m. We krijgen dus $1/3 \times 61,4 \text{ m} = 20,47 \text{ m}$.

Rechterdeel van de vergelijking:



Horizontale deel: 65,65 m. Dus "horizontaal" krijgen we: $1/3 \times 65,65 \text{ m} = 21,88 \text{ m}$. Verticaal gezien hebben we 2 delen namelijk 22,8 m (omlaag) + 7,87 m (omhoog) = totaal afgerond dus 30,7 m.

Voor de horizontale lengte rekenen we met de factor α . Volgens de NPR 3659 (en de NEN 3651:2020) kunnen we kiezen voor een waarde van 0 tot $1/3$ voor α . Bij klei op zand mag worden uitgegaan van $1/6$. Dus we krijgen $1/6 \times 65,65 \text{ m} = 10,94 \text{ m}$. De totale lengte van de kwelweg wordt dus $30,7 \text{ m}$ (verticaal) + $10,94 \text{ m}$ (horizontaal) = $41,61 \text{ m}$.

Kijken we weer naar de vergelijking: Dan is dus de uitkomst van het linkerdeel $20,47 \text{ m}$ en de uitkomst van het rechterdeel is $41,61 \text{ m}$. Dus links is kleiner dan rechts. Situatie door de HDD wordt er niet slechter op. Gelet op de lengtes van de verticale delen is dit wel logisch aangezien er sprake is van een aanzienlijke “kwelweg verlenging”.

Berekening met programma Sigma:

1) De Rottte → Poldersloot (Relatieve toetsing):

$$\Sigma L_{vo} = 0 \text{ m} / \Sigma L_{ho} = 61,4 \text{ m}$$

$$\Sigma L_{vn} = 30,7 \text{ m} / \Sigma L_{hn} = 65,65 \text{ m}$$

$$\alpha = 1/6$$

$$\Sigma L_{vo} + \Sigma 1/3 \cdot L_{ho} \leq \Sigma L_{vn} + \Sigma \alpha \cdot L_{hn}$$

$$0 + 1/3 \cdot 61,4 \leq 30,7 + 1/6 \cdot 65,65$$

$$20,47 \leq 41,64 \rightarrow \text{Voldoet}$$

Resultaat berekening met programma Sigma

Conclusie met betrekking tot de relatieve toetsing: Voldoet

5. Wat te doen indien sprake is van piping en kwel

Wanneer er sprake is van een verhoogd risico op kwel langs de aangelegde leiding, behoren maatregelen te worden genomen die de kans op kwel reduceren. Voorbeelden van zulke maatregelen zijn:

- kleikisten;
- kwelschermen;
- toepassing bij het intrekken van de leiding van uithardende, plastische blijvende en afsluitende boorvloeistof;
- toepassing van chemische injectie om een afsluitende impermeabele laag te herstellen.

De kleikisten en kwelschermen moeten worden aangebracht bij de in- en uittredepunten. Bij het intrekken van de leiding c.q. leidingbundel kan gebruik gemaakt worden van Drill Grout of een gelijkwaardige boorspoeling. Na afloop kan vanaf het maaiveld tot onder de gemaakte boring geïnjecteerd worden met bijvoorbeeld grout of waterglas om kwel tegen te gaan.

De eerste optie is echter om te onderzoeken of het boorprofiel kan worden aangepast waardoor geen kwel kan optreden.

6. Samenvatting

In de NEN 3651 en in de NPR 3659 wordt uitgebreid stil gestaan bij het verschijnsel kwel bij een horizontaal gestuurde boring. Tijdens het ontwerpen van een HDD moet onderzocht worden of er een risico is op kwel. Een berekeningsmethode hiervoor is voorgeschreven in de NEN 3651:2020.

Er worden twee toetsingen uitgevoerd. De **absolute toetsing** en de **relatieve toetsing**.

Bij de absolute toetsing is de creep-factor C_L van belang. De grootte hiervan is afhankelijk van de grondsoort die ter plekke aanwezig is. Het maakt hierbij een groot verschil of sprake is van klei, veen, zand of grind.

Bij de relatieve toetsing is de factor α van belang. Deze varieert van 0 tot $1/3$. Gelet op de NPR 3659 is het reëel om uit te gaan van een factor α van $1/6$. Maar in het programma Sigma kan de gebruiker hiervan afwijken.

Wanneer sprake is van bijvoorbeeld een rivierwaterkering dan moet rekening gehouden worden met hoogst mogelijke rivierwaterstand. In het algemeen is dit 0,5 m tot 1,0 m onder de kruin van de rivierwaterkering.

Bij een boezemkanaal is minder sprake van grote fluctuaties van de waterstanden. Daar is de maximale waterstand hoogstens enige decimeters boven het boezempeil. Voor de kwelwegbeschouwing is het bij boezemwaterkeringen realistisch om uit te gaan van het “normaal” aanwezige waterpeil.

Doordat een boorgat afsluitende toplagen kan doorsnijden bij boringen in kwelgebieden is een beoordeling van kwel, ook in situaties zonder waterkeringen, relevant.

Kwel vanuit een dieper gelegen watervoerende laag met een hogere stijghoogte dan de freatische grondwaterstand kan optreden als ter plaatse van het boorgat de verbinding met de afsluitende grondlagen niet wordt gerealiseerd.