

Model voor inploegen leidingen

FLIP, Fast Low cost Installation of Pipelines



Model voor inploegen leidingen
FLIP, Fast Low cost Installation of Pipelines

Auteur(s)
Piet Meijers

Model voor inploegen leidingen

FLIP, Fast Low cost Installation of Pipelines

Opdrachtgever	TKI Deltatechnologie
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Leiding, aanleg, inploegen, landelijk gebied, wandwrijving, trekkracht, maaiveldvorming

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	21-11-2023
Projectnummer	11209042-002
Document ID	11209042-002-GEO-0001
Pagina's	93
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Piet Meijers	Henk Kruse

Samenvatting

Grote diameter leidingen in landelijk gebied worden meestal aangelegd in een gegraven sleuf. Dit heeft het nodige grondverzet tot gevolg. Een alternatieve aanlegmethode is het zogenaamde 'inploegen' van leidingen. Om deze methode te kunnen toepassen voor grote diameter leidingen is het onderzoek FLIP (Fast Low cost Installation of Pipelines) opgestart. Onderdeel hiervan is het opstellen van een methode om de benodigde trekkrachten bij de installatie van de leidingen te bepalen.

Voor het bepalen van de aanlegkrachten bij inploegen zijn twee modellen opgesteld. Het eerste model beschouwd de weerstand die de ploeg zelf levert tijdens het inploegen. Het tweede model kan worden gebruikt om de weerstand die de in te trekken leiding levert tijdens het inploegen te berekenen.

Het model voor de weerstand van de ploeg zelf is gebaseerd op een sommatie van de weerstand van de verschillende onderdelen van de ploeg. Dat zijn de ripper shoe, het zwaard en de torpedo achter de ploeg. Ook wordt de berekening van de trekkracht die wordt geleverd door het grondreactieschot beschouwd. In het rapport wordt de afleiding van de formules voor de verschillende onderdelen gegeven.

Het model voor de weerstand van de leiding bij intrekken is gebaseerd op de totale wrijvingsweerstand langs de leiding. Het model is gevalideerd met behulp van de resultaten van uitgevoerde proeven op prototype schaal. Bij die metingen is geconstateerd dat tijdseffecten tijdens het inploegen niet verwaarloosbaar zijn. Het model voor de berekening van de wrijvingsweerstand langs de leiding is daarom uitgebreid, zodat de tijdseffecten konden worden meegenomen. In het rapport wordt een toelichting gegeven op de afleiding van de formules voor de weerstand tijdens intrekken en de wijze waarop het tijdseffect meegenomen kan worden in de berekeningen. Tevens zijn formules gegeven voor de berekening van de wrijvingsweerstand van de leiding tijdens de bedrijfsfase. Voor berekeningsdoeleinden zijn de formules uitgeschreven in de bijlage van dit rapport.

De beschrijving van de methode van het inploegen en de leidingsterkte berekeningen zijn weergegeven in separate rapporten van het FLIP onderzoeksproject.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Algemeen	8
1.2	Doelstelling FLIP	9
1.3	Leeswijzer	9
2	Beschrijving inploegen	10
3	Uitgevoerde veldtesten	15
3.1	Introductie	15
3.2	Opzet veldproeven	15
3.3	Gemeten waarden, overzicht	15
3.4	Afmetingen leiding, lier en ploeg	16
3.4.1	Diepteligging leiding	16
3.4.2	Afmetingen lier	16
3.4.3	Afmetingen ploeg	16
3.5	Gemeten kracht op kop leiding	17
3.6	Berekening grondweerstand leiding bij intrekken	17
3.7	Gemeten krachten, weerstand ploeg	18
4	Modellering intrekken, kwalitatief	19
4.1	Beschrijving onderdelen	19
4.2	Krachten op lier	19
4.2.1	Krachten bij grondschoot	19
4.2.2	Krachten door gewicht lier machine	19
4.3	Tractie ploeg	21
4.4	Weerstand biedende krachten	21
4.4.1	Weerstand biedende krachten, ploeg	21
4.4.2	Weerstand biedende kracht, leiding	24
4.5	Overzicht krachten	24
5	Berekening trekkracht lier	26
5.1	Weerstand lier	26
5.2	Grondschoot	26
5.3	Wrijving lier	27
5.4	Totale trekkracht	27
6	Berekening weerstand ploeg	28

6.1	Weerstand ploeg, algemeen	28
6.2	Weerstand ripper shoe	28
6.2.1	Keuze modellering	28
6.2.2	Wrijvingscomponent	29
6.2.3	Snijden van grond component	30
6.2.4	Omhoog drukken grond component	31
6.2.5	Totaal ripper shoe	34
6.3	Zwaard	35
6.3.1	Wrijvingscomponent	35
6.3.2	Snijden van grond component	36
6.3.3	Totaal Zwaard	37
6.4	Torpedo	38
6.4.1	Weerstand op voorkant torpedo	38
6.4.2	Wrijvingscomponent	38
6.4.3	Totaal Torpedo	40
6.5	Totale Ploeg kracht	40
7	Berekening weerstand leiding	41
7.1	Algemeen	41
7.2	Modellering axiale weerstand leiding bij de aanlegfase	42
7.3	Modellering axiale weerstand leiding bij de bedrijfsfase	44
8	Conclusie en aanbevelingen	47
8.1	Samenvatting en conclusies	47
8.2	Aanbevelingen	47
A	Ontwerp berekeningen	49
A.1	Overzicht krachten	49
A.2	Trekkkracht	50
A.2.1	Grondschoot	50
A.2.2	Wrijving lier	51
A.2.3	Totale trekkkracht	51
A.3	Ploeg	52
A.3.1	Ripper shoe	52
A.3.1.1.	Wrijvingscomponent	52
A.3.1.2.	Snijden van grond component	52
A.3.1.3.	Omhoog drukken grond component	53
A.3.1.4.	Totaal ripper shoe	55
A.3.2	Zwaard	55
A.3.2.1.	wrijvingscomponent	55
A.3.2.2.	Snijden van grond component	55
A.3.2.3.	Totaal Zwaard	56
A.3.3	Torpedo	57
A.3.3.1.	Wrijvingscomponent	57
A.3.3.2.	Weerstand op voorkant torpedo	58
A.3.3.3.	Totaal Torpedo	59
A.3.4	Totale Ploeg kracht	60

A.4	Wrijvingskracht langs de leiding	60
A.4.1	Aanlegfase, tijdens inploegen leiding	60
A.4.2	Gebruiksfase na aanleg door Ploegen	62
B	Bepaling modelfactor voor weerstand ploeg, onderdeel omhoogdrukken grond	63
B.1	Doelstelling	63
B.2	Modelleren in PLAXIS	63
B.3	Resultaten PLAXIS berekening	64
B.4	Resultaten analytisch model	64
C	Validatie weerstand leiding	66
C.1.1	Selectie grondparameters testlocaties	66
C.1.2	Verificatie en validatie model	66
C.1.2.1.	Biddinghuizen, klei onverzadigd	67
C.1.2.2.	Biddinghuizen, onverzadigd zand	69
C.1.2.3.	Biddinghuizen, verzadigd zand	70
C.1.2.4.	Sliedrecht, veen	71
C.1.3	Overzicht resultaten	75
D	Narekenen situatie inploegen leiding bij Aalsmeer	76
D.1	Situatie	76
D.2	Geselecteerd grondprofiel voor de analyses	77
D.3	Wrijvingsweerstand leiding	78
D.4	Weerstand ploeg	80
D.4.1	Weerstand ripper shoe	80
D.4.2	Weerstand zwaard	81
D.4.3	Weerstand torpedo	81
D.4.4	Sommatie krachten	81
D.5	Weerstand lier	82
D.6	Sommatie krachten	83
E	Modelleren effect tijd op wrijvingsweerstand leiding	85
E.1	Beschikbare meetwaarden	85
E.2	Afleiding model effect lange duur	87
E.3	Effect lange leiding	89
E.4	Effect lange duur, best-estimate waarden voor ontwerp	91
F	Waarden trekkracht lier	92

1 Inleiding

1.1 Algemeen

De meest gebruikte methode voor het leggen van leidingen is het graven van een sleuf, de leiding te leggen en de sleuf weer te vullen met uitkomende grond. Bij aanleg in landbouwgebieden betekent dit dat zorgvuldig omgegaan moet worden met het terugbrengen van de diverse grondlagen om een verslechtering van de grondcondities te voorkomen. Andere nadelen bij leiding aanleg in een sleuf zijn de tijdelijke bemaling en het ruimtebeslag voor zowel de sleuf als het tijdelijk in depot leggen van de grond en de uitvoeringsduur.



Figuur 1-1 Voorbeeld traditionele aanleg leiding in een sleuf (Foto: A. Hak).

Een alternatieve aanlegmethode is het gebruik van een ploeg waarbij de leiding in de grond wordt getrokken en waarbij de grond rond de leiding wordt verdrongen. Deze methode van grondverdringend intrekken wordt ook wel inploegen genoemd.

Deze methode wordt in het buitenland al langer gebruikt voor de aanleg van kabels en kleine diameter leidingen. In Nederland wordt de methode al wel toegepast voor het installeren van kabels. De wens bestaat om deze techniek ook toe te passen voor grotere leidingdiameters, zodat bijvoorbeeld ook warmteleidingen hiermee aangelegd kunnen worden.

De methode heeft onder andere de volgende voordelen:

- Geen grondverplaatsing.
- Geen bemaling.
- Bodemprofiel wordt nagenoeg niet beïnvloed.
- Korte uitvoeringsduur.
- Snelle uitvoering.
- Lage kosten.

Het belangrijkste nadeel van de methode is de kruising van bestaande infrastructuur (kabels en leidingen van derden). De techniek is daarom het meest effectief in open gebieden en minder geschikt in stedelijke gebieden met veel kabels en leidingen.

1.2 Doelstelling FLIP

Het onderzoeksproject FLIP (Fast Low cost Installation of Pipelines) levert een bijdrage aan het geschikt maken van de ploegmethode voor de aanleg van leidingen met een grotere diameter, zoals warmteleidingen of waterstofleidingen. Door het testen van de methoden en het analyseren van het proces tijdens het inploegen aan de hand van metingen wordt inzicht verkregen in deze methode voor leiding aanleg. Uiteindelijk moet het inzicht leiden tot een beschrijving van de methode van het ploegen en modellen om de krachten voor de leiding aanleg te berekenen. Ook de berekening van de sterkte van de leiding bij de aanleg fase en de bedrijfsfase is onderdeel van het onderzoek.

Door de resultaten van het FLIP onderzoek te gebruiken kan worden aangetoond dat de maaiveld verstoring beperkt is en dat de sterkte van de leiding bij de installatie en in de bedrijfsfase niet wordt overschreden.

Het voorliggende rapport beschrijft de modelvorming voor de berekening van de weerstand van de ploeg en voor de berekening van de weerstand van de leiding tijdens het intrekken. De beschrijving van de methode en de leidingsterkte berekeningen zijn weergegeven in separate rapporten van het FLIP onderzoeksproject.

1.3 Leeswijzer

In de volgende hoofdstukken worden achtereenvolgend de volgende aspecten besproken:

- Hoofdstuk 2 een beschrijving van de methode, inclusief de voor- en nadelen.
- Hoofdstuk 3 een korte beschrijving van de uitgevoerde veldtesten, een uitgebreidere beschrijving is te vinden in het factual rapport (rapportnummer 11207924-002-GEO-0001_v2.0, september 2023).
- Hoofdstuk 4 tot 7 modellering inploegen, hierbij worden de volgende onderdelen onderscheiden:
 - Kwalitatieve beschrijving mechanismen.
 - Mobilisatie trekkracht.
 - Weerstand van de ploeg.
 - Weerstand van de leiding.
- Hoofdstuk 8 conclusies en aanbevelingen.

2 Beschrijving inploegen

Een innovatieve methode voor het aanleggen van leidingen in landelijk gebied is het zogenaamde 'inploegen'. Voor het inploegen worden twee machines gebruikt, de eigenlijke ploeg en een aparte lier voor het leveren van de trekkracht op de ploeg. De methode kan worden gebruikt voor het intrekken van flexibele leidingen en het intrekken van stijvere leidingen. Bij een flexibele leiding wordt de leiding direct bij de ploeg in de grond gebracht. Het is daarbij niet nodig om de leiding door de grond te trekken. Dit kan alleen met leidingen waarbij de minimale bochtstraal voldoende klein is (orde enige meters). De stijfheid van een grote diameter leiding is dusdanig dat de deze niet voldoende flexibel is, en dus als een stijvere leiding beschouwd moet worden.

Bij het intrekken van stijvere leidingen wordt de in te trekken leiding uitgelegd op de grond. De leiding is dan voorzien van een trekkop die wordt verbonden met de ploeg. Deze koppeling vindt plaats in de zogenaamde 'torpedo' (Figuur 2-1), die dient om de grond opzij te duwen en daarmee ruimte voor de leiding te maken. Een variant is dat er geen torpedo wordt gebruikt, maar dat de leiding direct aan de achterzijde van de ripper shoe wordt gekoppeld (Figuur 2-3).

De trekkop is vastgemaakt aan een zogenaamd zwaard, waarmee de grond wordt losgesneden. Dit zwaard is voorzien van een 'ripper shoe' (zie Figuur 2-4), die de grond horizontaal doorsnijdt. Vervolgens kan de leiding in de grond worden getrokken. Daarbij wordt de leiding onder een opgegeven helling in de grond getrokken totdat het aanlegniveau is bereikt. Vervolgens wordt de leiding horizontaal verder getrokken.



Figuur 2-1 De ploeg met torpedo (foto: Deltares).



Figuur 2-2 Torpedo met leiding, links 12" leiding, recht 28" leiding (foto: Deltares).



Figuur 2-3 Ploeg zonder torpedo, de leiding is direct aan de ripper shoe gekoppeld (foto: Deltares).



Figuur 2-4 Detail opname ripper shoe, tevens is onderste deel zwaard te zien (foto: Deltares).

De ripper shoe is met de ploeg verbonden met een zogenaamd 'zwaard' dat de grond doorsnijdt (Figuur 2-5). Het resultaat is een verticale ploegvoor in de ondergrond en enige verticale vervorming van het maaiveld. Tijdens testen is gebleken dat deze ploegvoor met bijvoorbeeld een rupskraan of een ander relatief zwaar voertuig makkelijk dichtgedrukt kan worden (Figuur 2-6).



Figuur 2-5 Grondvervorming bij intrekken, locatie test Sliedrecht (foto: Deltares).



Figuur 2-6 Ploegvoor en maaiveld na aanrijden met een rupsvoertuig (het zogenaamde 'aanrupsen'), locatie test Sliedrecht (foto: Deltares).

Om de benodigde trekkracht te leveren wordt gebruik gemaakt van een speciale liermachine (Figuur 2-7). Deze ontleent zijn weerstand weer aan een grondschoot dat in de grond wordt gedrukt (Figuur 2-8). Het grondschoot steekt iets naar voren. Daardoor zal bij opvoeren van de kracht op de lier deze de neiging zal hebben om zichzelf in te graven en daarmee de weerstand te verhogen, zie Figuur 2-8. Te zien is dat daardoor de grond voor het schoot omhoog komt, wat ook bijdraagt aan de toename van de weerstand van het schoot.



Figuur 2-7 Machine met lier en grondschoot (foto: Deltares).



Figuur 2-8 Grondschot lier, met maximale indringing (foto: Deltares).

3 Uitgevoerde veldtesten

3.1 Introductie

Als onderdeel van het onderzoek zijn er in 2022 in Biddinghuizen en Sliedrecht veldtesten uitgevoerd. Een beschrijving van de testen en de gemeten parameters is opgenomen in het betreffende factual rapport. (rapportnummer 11207924-002-GEO-0001_v2.0, september 2023).

Voorafgaand aan de beschrijving van het model voor de ontwerp berekeningen worden de belangrijkste resultaten in de volgende paragrafen kort samengevat.

3.2 Opzet veldproeven

Bij de veldproeven is een leiding met een lengte van 48 m (4 leidingsegmenten van 12 m) door de grond getrokken. Nadat de leiding geheel in de grond lag is een proefkuil gegraven om de mogelijke verstoring van de ondergrond te onderzoeken. Daardoor was er een stilstand van ongeveer 2 uur voordat de leiding weer werd uitgetrokken.

Bij de veldtesten on Biddinghuizen is een leiding met een diameter van 12" gebruikt. Door het kiezen van verschillende diepten was het mogelijk om de leiding daar door onverzadigde klei, onverzadigd zand en verzadigd zand te trekken.

In Sliedrecht zijn drie verschillende leidingdiameters gebruikt, namelijk 12", 24 " en 28". De laatste leiding bevatte een leidingsegment van een warmteleiding. De ondergrond ter plaatse was veen.

3.3 Gemeten waarden, overzicht

Tijdens de veldtesten zijn o.a. de volgende parameters gemeten.

- Ondergrond:
 - Sonderingen en boringen.
- Trekkrachten:
 - Trekkraft bij de lier.
 - Trekkraft bij trekkop leiding.
 - Rekstrookjes bij begin tweede leidingsegment, op ongeveer 12,5 m achter trekkop.
- Maaiveldligging vooraf en nadat de leiding was ingetrokken:
 - Meting met GPS.

De trekkraft bij de lier is niet met een automatisch registrerend apparaat gemeten. De beschikbare waarden volgen uit een mondelinge opgave van de machinist. Er is geen continue meting met het verloop van de kracht in de tijd beschikbaar maar slechts een enkele waarde. Niet bekend is of dit een piekwaarde of een representatieve waarde van de gemiddelde trekkraft is (zie Bijlage F).

De kracht bij de trekkop van de leiding is continu gemeten. Hier is een continue meting in de tijd beschikbaar.

3.4 Afmetingen leiding, lier en ploeg

3.4.1 Diepteligging leiding

Tabel 3-1 geeft de belangrijkste parameters van de grondslag en van de gronddekking op de leiding bij de verschillende testen.

Tabel 3-1 Overzicht gronddata bij de inploegtesten.

Test-locatie	Grondslag	Maai-veld [m + NAP]	Grondwaterstand [m + NAP]	qc [MPa]	Diameter leiding	Wanddikte [mm]	bk leiding [m+NAP] ³⁾	Gronddekking [m]
Biddinghuizen	klei, onverz	-2,9	-4,5	2	12 "	8	-3,8	0,9
	zand, onverz	-2,9	-4,5	3	12 "	8	-3,9	1,0
	zand, verzad	-2,85	-4,5	3 ²⁾	12 "	8	-4,95	2,1
Sliedrecht	veen	-1,65	-2,0	0,4	12 "	8	-3,4	1,75
	veen	-1,75	-2,0	0,4	24 "	8	-3,5	1,75
	veen	-1,5	-2,0	0,4	28 "	8 ¹⁾	-3,0	1,5

¹⁾ schatting, wanddikte stalen leiding 28" is niet gerapporteerd.

²⁾ schatting, conusweerstand diep zand Biddinghuizen niet gemeten.

³⁾ gemiddelde waarde, varieert enigszins langs tracé.

3.4.2 Afmetingen lier

De relevante afmetingen van de lier zijn:

- Massa: 27,5 ton.
- Breedte rups (per rups): $B_{\text{rups}} = 1,0$ m.
- Lengte rups op ondergrond: $L_{\text{rups}} = 5$ m.
- Afmetingen grondschoot:
 - Diepte: 1,7 m.
 - Breedte: 2,5 m.

3.4.3 Afmetingen ploeg

De voor deze analyse relevante afmetingen van de ploeg zijn:

- Massa: 32 ton.
- Afmetingen ripper shoe.
 - Breedte over tanden: 0,9 m.
 - Lengte: 1,2 m.
- Afmetingen zwaard.
 - Breedte: 0,122 m.
 - Lengte in ploegrichting: 0,9 m.
- Afmetingen torpedo.
 - Bij 12" leiding: $D = 0,41$ m, $L = 3,50$ m.
 - Bij 24" leiding: $D = 0,71$ m, $L = 3,80$ m.
 - Bij 28" leiding: $D = 0,91$ m, $L = 6,00$ m.

3.5 Gemeten kracht op kop leiding

De trekkracht op de leiding is afgelezen uit de gemeten trekkrachten bij de trekkop. Bij de veldproeven is er sprake geweest van een stilstand tijdens het graven van de inspectieput. In de uitwerking worden daarom twee situaties onderscheiden, namelijk de periode tot het moment van stilstand en het moment als na de stilstand de leiding verder wordt getrokken. Deze momenten worden aangeduid als 'intrekken' en 'uittrekken'.

Bij de meting op 25 januari is in het tracé een boomstam aangetroffen, die een verhoogde weerstand gaf. Daarom zijn voor de kracht bij intrekken in Tabel 3-2 twee getallen gegeven.

Tabel 3-2 Overzicht gemeten krachten.

Testlocatie	Biddinghuizen			Sliedrecht		
	19-jan	19-jan	20-jan	24-jan	25-jan	6-apr
testdatum	19-jan	19-jan	20-jan	24-jan	25-jan	6-apr
D [duim]	12"	12"	12"	12"	24"	28"
D [m]	0,3239	0,3239	0,3239	0,3239	0,6098	0,7112
t [m]	0,008	0,008	0,008	0,008	0,0087	0,0087
F _{intrek} [tonf]	27	16	15	5	12 /6,7 ¹⁾	10
F _{uittrek} [tonf]	53	24	17,5	4	12,4	13
F _{lier} [kN] ²⁾	942	883	981	391	805	-

¹⁾ Eerste getal is de hoogste gemeten waarde (bij boomstam), tweede getal is voor situatie zonder boomstam.

²⁾ Volgens mondelinge opgave.

3.6 Berekening grondweerstand leiding bij intrekken

De grondweerstand (wrijving leiding-grond) is bepaald door de kracht op de kop van de leiding te delen door het oppervlak van de leiding dat in contact is met de grond. Daarbij is gecorrigeerd voor het deel van de leiding dat in de torpedo zit en dus geen contact heeft met de grond.

Tabel 3-3 Grondweerstand inploegproeven.

Testlocatie	Biddinghuizen			Sliedrecht		
	19-jan	19-jan	20-jan	24-jan	25-jan	6-apr
datum	19-jan	19-jan	20-jan	24-jan	25-jan	6-apr
grondsoort	klei, onverzadigd	zand, onverzadigd	zand, verzadigd	veen	veen	veen
D [duim]	12"	12"	12"	12"	24"	28"
τ_{intrek} [kPa]	5,90	3,49	3,28	1,09	0,78	1,16
τ_{uittrek} [kPa]	11,57	5,24	3,82	0,87	1,44	1,51
$\tau_{\text{uittrek}} / \tau_{\text{intrek}}$ [-]	1,96	1,50	1,17	0,80	1,85	1,30

De hoogste wandwrijving wordt gevonden voor de grondslag met (onverzadigde) klei. Verder valt op dat na enige stilstand (tijdens de veldproeven was dat 1 tot uur) er bijna altijd een toename van de wandwrijving wordt gevonden. Wat deze toename bij langere stilstand is, is uit deze veldproeven niet vast te stellen, maar verwacht mag worden dat het nog meer zal zijn. Dit is een aspect waar rekening mee moet worden gehouden indien de lieren een of

meer keren verplaatst moeten worden als er langere leidinggedeelten ingetrokken worden. Ook als om andere redenen het intrekken voor langere tijd wordt onderbroken, zoals bij een kapotte lier of andere onvoorziene omstandigheden, mag een toename van de wrijving worden verwacht.

3.7 Gemeten krachten, weerstand ploeg

De weerstand van de ploeg volgt uit de volgende krachten:

- Kracht op lier, F_{lier} .
- Tractie ploeg, $F_{tractie}$.
- Weerstand ploeg, F_{ploeg} .
- Kracht op kop leiding, $F_{leiding}$.

In formulevorm wordt dit:

$$F_{lier} + F_{tractie} - F_{ploeg} - F_{leiding} = 0$$

En hieruit laat zich voor de netto weerstand van de ploeg afleiden:

$$F_{ploeg} - F_{tractie} = F_{lier} - F_{leiding}$$

De kracht op de kop van de leiding, $F_{leiding}$, is goed bekend. De kracht bij de lier, F_{lier} , is niet goed bekend en de opgegeven waarden zijn onbetrouwbaar (Bijlage F). De tractie die de ploeg zelf levert, $F_{tractie}$, is onbekend.

4 Modellering intrekken, kwalitatief

4.1 Beschrijving onderdelen

In dit hoofdstuk worden de verschillende onderdelen die van belang zijn bij het beschouwen van het krachterevenwicht beschreven. De lier levert de trekkracht die de ploeg en de leiding laat voortbewegen.

4.2 Krachten op lier

4.2.1 Krachten bij grondschoot

Voor de mobilisatie van de trekkracht zijn er drie componenten. De eerste is de weerstand vanuit het grondschoot. De tweede component wordt geleverd door de lier zelf, en meer specifiek de weerstand die gemobiliseerd kan worden op het grensvlak lier-ondergrond.

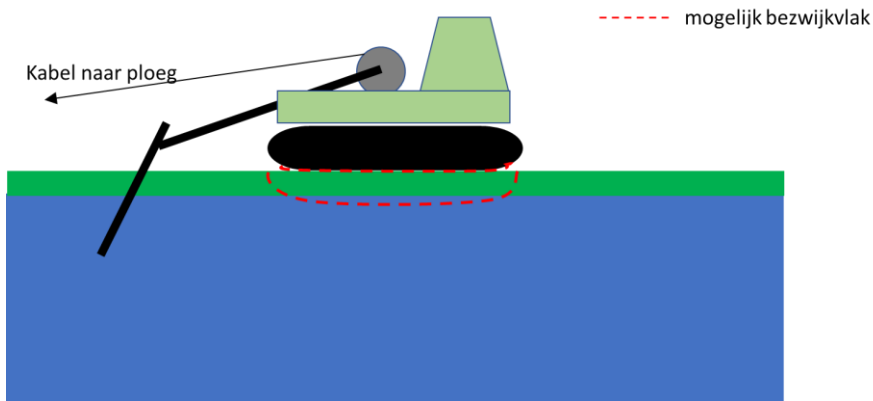


Figuur 4-1 Machine met lier met grondschoot (foto: Deltares).

De weerstand die het grondschoot kan leveren is in feite de passieve grondweerstand tegen de voorkant van het schoot, minus de actieve gronddruk tegen de achterzijde. Door de grotere diepte die het schoot bereikt tijdens het intrekken neemt de passieve weerstand toe.

4.2.2 Krachten door gewicht lier machine

De lier zelf heeft een eigen gewicht en kan daarmee door wrijving met de ondergrond ook een weerstand mobiliseren. De mogelijk bezwijkvlakken zijn het verschuiven van de rupsen over de ondergrond (grasmat of, indien toegepast, rijplaat). Een dieper liggend glijvlak is ook mogelijk, bijvoorbeeld het verschuiven van lier plus grasmat over de ondergrond. Figuur 4-2 toont de mogelijke bezwijkvlakken.



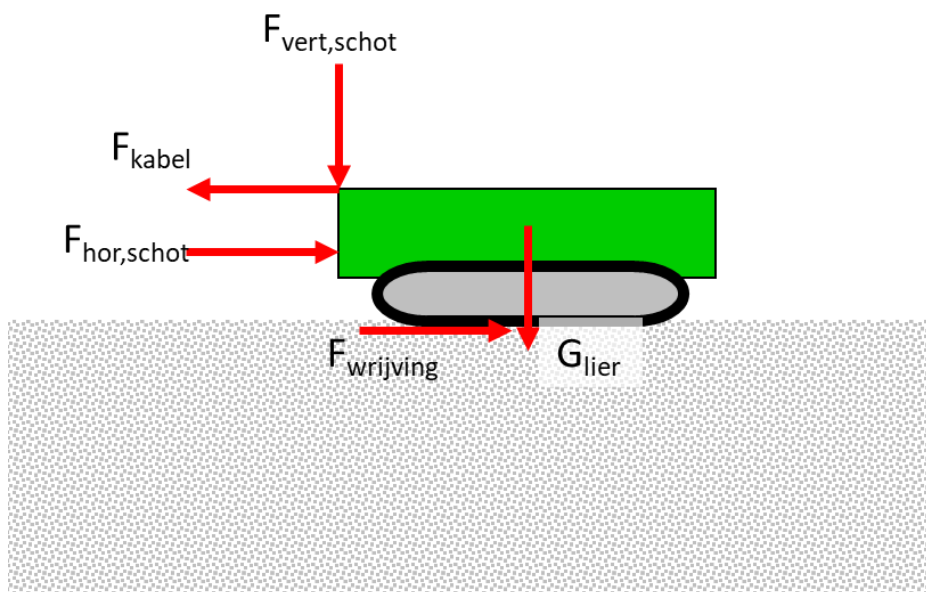
Figuur 4-2 Mogelijk bezwijkvlakken (rode streep-streep lijnen) bij belasting lier.

Voor het verticaal fixeren van het grondschoot is een verticale kracht nodig die door de lier geleverd moet worden. Dit is van invloed op de verticale kracht die via de rupsen op de ondergrond overgedragen zal worden, en dus beschikbaar is voor het mobiliseren van de wrijvingsweerstand van de lier met de ondergrond.

Op de liermachine, exclusief grondschoot, werken de volgende krachten:

- Eigen gewicht (G_{lier}).
- Wrijving met de ondergrond (F_{wrijving}).
- Horizontale kracht vanuit het grondschoot ($F_{\text{hor,schoot}}$).
- Verticale kracht vanuit het grondschoot ($F_{\text{vert,schoot}}$).
- Kracht op de kabel (F_{kabel}).

Figuur 4-3 toont schematisch deze krachten.



Figuur 4-3 krachten op liermachine.

Voor de bepaling van de wrijvingsweerstand van de lier met de ondergrond zullen alle relevante bezwijkvormen in beschouwing moeten worden genomen. De volgende bezwijkvormen moeten worden beschouwd:

- Verschuiven van de liermachine over de ondergrond.
- Indien de liermachine op rijplaten of draglineschotten staat: verschuiven van de rijplaten over de ondergrond (graszode).
- Bij een grasmat: verschuiven van de grasmat over de onderliggende grond.

4.3 Tractie ploeg

De ploeg zelf heeft een eigen aandrijving. Deze aandrijving is deels nodig om de rolweerstand tijdens het rijden van de ploeg zelf te overwinnen. Daarnaast kan deze een extra trekkraft leveren. Informatie over de grootte van de te leveren tractie is momenteel niet beschikbaar. Naar verluidt is de bijdrage beperkt en kan deze in de beschouwing worden verwaarloosd.



Figuur 4-4 Ploeg op rijplaten (foto: Deltares).

4.4 Weerstand biedende krachten

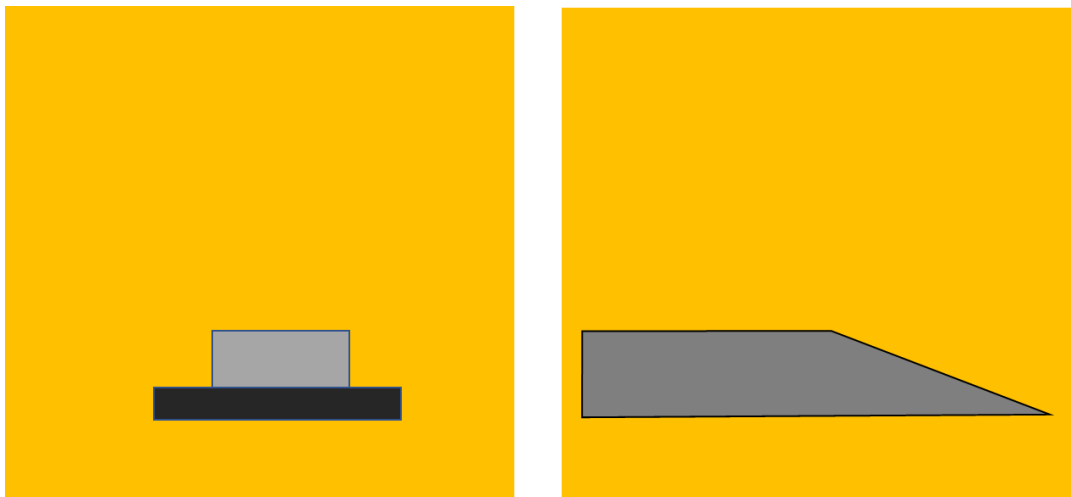
De weerstand bij het intrekken wordt geleverd door de ploeg en door de wrijving langs de leiding.

4.4.1 Weerstand biedende krachten, ploeg

De ploeg zorgt voor een weerstand, die is opgebouwd uit een aantal onderdelen. Het eerste onderdeel is de ripper shoe, die door de grond wordt getrokken. Daarbij moet grond worden weggedrukt. De ripper shoe heeft aan de voorkant een wigvormige vorm. De breedte is bij de tanden het grootst. Direct achter de tanden versmalt de ripper shoe. Gezien deze vorm van de ripper shoe is de grondverplaatsing voornamelijk een verplaatsing omhoog. De weerstand wordt gevormd door de kracht die nodig is voor het snijden van de grond, het omhoog drukken van de grond en vervolgens de wrijving tussen de grond en de ripper shoe.

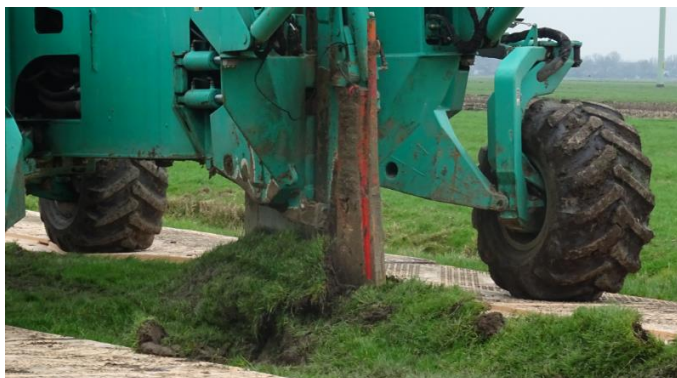


Figuur 4-5 Ripper shoe (foto: Deltares).



Figuur 4-6 Passage ripper shoe, links vooraanzicht, rechts zij-aanzicht.

Aan het einde van de ripper shoe bevindt zich de verbinding met de ploegmachine. Hier is het zogenaamde zwaard aanwezig. Dit zwaard heeft de vorm van plaat die door de grond snijdt.



Figuur 4-7 Zwaard (foto: Deltares).

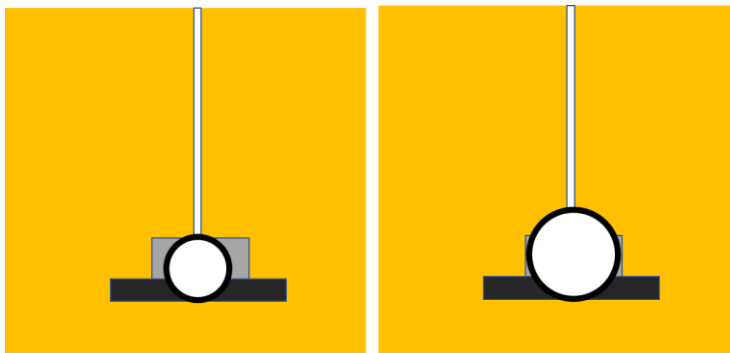
De weerstand wordt gevormd door de kracht die nodig is voor het snijden door de grond (zijdelings wegdrücken van de grond) en vervolgens door de wrijvingsweerstand langs de zijkant van het zwaard.

Na het passeren van het zwaard is er in de grond sprake van een ploegvoor. Deze zal deels dichtgedrukt worden door de horizontale grondspanning, maar nabij het maaiveld kan de ploegvoor nog wel open staan.



Figuur 4-8 Ploegvoor in veen (foto: Deltares).

Direct achter de ripper shoe en het zwaard zit de torpedo. Afhankelijk van de afmetingen van de in te trekken leiding zit de voorkant geheel of gedeeltelijk in de schaduw van de ripper shoe. In het eerste geval zal de kracht tegen de voorkant van de torpedo verwaarloosbaar zijn, in het tweede geval moet de torpedo een deel van de grond zijdelings wegdrücken.



Figuur 4-9 Situatie torpedo ten opzichte van de ripper shoe, situatie met relatief kleine diameter en met grote diameter torpedo. De witte verticale balk geeft de ploegvoor aan.

Als de diameter van de torpedo groter is dan de dikte van de ripper shoe zal de torpedo grond moeten verdringen. Dit geeft een extra weerstand op de kop van de torpedo. Ook kan daardoor de radiale spanning op de zijkant van de torpedo toenemen.

Als de diameter van de torpedo groter is dan de dikte van de ripper shoe zal de torpedo grond moeten verdringen. Dit geeft een extra weerstand op de kop van de torpedo. Ook kan daardoor de radiale spanning op de zijkant van de torpedo toenemen.

4.4.2 Weerstand biedende kracht, leiding

Na de torpedo wordt de weerstand gevormd door de wrijvingsweerstand tussen leiding en grond.

De leiding is aan de binnenzijde van de torpedo met de ploeg verbonden. De diameter van de torpedo is groter dan die van de leiding. Dat betekent dat achter de torpedo de grond iets terug moet komen om contact te maken met de leiding. De verwachting is dat direct achter de torpedo de grondwrijving gering zal zijn, maar op enige afstand toeneemt omdat de grond dan weer de leiding raakt. Uit de ontgravingen c.q. proefkuilen bij de uitgevoerde testen is gebleken dat er weer contact is tussen de grond en de leiding.



Figuur 4-10 Situatie van de leiding direct achter de torpedo (foto: Deltares).

De totale intrekweerstand volgt uit de integratie van de wrijvingsweerstand over het oppervlak van de leiding. Deze wrijvingsweerstand is in principe niet gelijk over de omtrek van de leiding en mogelijk ook een functie van de afstand tot de ploeg of de plaats. Daarnaast is er sprake van een wrijvingsweerstand voor het gedeelte van de leiding dat op de rollenbaan ligt en kan er nog een extra weerstand ontstaan door de buiging van de leiding bij het intrekken.

4.5 Overzicht krachten

Uit de voorgaande kwalitatieve beschrijving volgt dat de volgende componenten een rol spelen in de krachtswerking:

- Te leveren trekkracht (F_{trek}):
 - Grondschoot.
 - Wrijving lier-ondergrond.
 - Tractie ploeg (verwaarloosbaar).
- Weerstandskrachten ploeg (F_{ploeg}):
 - Ripper shoe:
 - Snijden en omhoogdrukken grond.
 - Wrijving ripper shoe met grond langs boven- en onderkant.
 - Wrijving zijkant ripper shoe met grond (is verwaarloosbaar).
 - Zwaard:
 - Snijden grond.
 - Wrijving zijkant zwaard met de grond.
 - Torpedo (indien aanwezig, dit is niet altijd het geval)

- Verdringen grond (meestal verwaarloosbaar omdat torpedo gedeeltelijk in schaduw van ripper shoe en zwaard ligt).
- Wrijving langs zijkant torpedo.
- Weerstand biedende kracht leiding ($F_{leiding}$)
 - Wrijving langs leiding.
 - Buiging leiding bij intreklocatie.

De te leveren trekkracht dient groter te zijn dan de weerstand biedende krachten:

$$F_{trek} > F_{ploeg} + F_{leiding} - F_{tractie}$$

5 Berekening trekkracht lier

5.1 Weerstand lier

De trekkracht van de lier wordt door de volgende componenten geleverd:

- Grondschoot: F_{schot} .
- Wrijving lier met ondergrond: F_{wrijving} .

De te leveren trekkracht door de Lier kan worden berekend met de reactie kracht vanuit het grondschoot, de wrijving van de lier met de ondergrond verminderd met de tractie van de ploeg. De tractie van de ploeg wordt in de berekening op conservatieve wijze verwaarloosd.

5.2 Grondschoot

De reactie druk vanuit het grondschoot bestaat uit een passieve en een actieve component. De passieve weerstand (spanning) kan worden berekend door:

$$\sigma_{pas} = K_{pas,h} \cdot \sigma'_v + 2c \sqrt{K_{pas}}$$

Waarbij:

- $K_{pas,h}$ Horizontale component van de passieve gronddruk coëfficiënt:

$$K_{pas,h} = \frac{\cos^2(\phi)}{(1 - \sqrt{\sin^2(\phi) + \sin\phi \cos\phi \tan\delta})^2}$$

Met:

- ϕ Hoek van inwendige wrijving ($^\circ$).
- δ Wandwrijvingshoek ($^\circ$).
- σ'_v Effectieve verticale spanning op de halve hoogte van het schoot (kPa).

Voor granulaire gronden kan de wandwrijvingshoek worden bepaald door de helft van de hoek van inwendige wrijving te nemen.

De actieve weerstand (spanning) op het grondschoot kan worden berekend door:

$$\sigma_{act} = K_{act,h} \cdot \sigma'_v - 2c \sqrt{K_{act}}$$

Waarbij:

- $K_{act,h}$ Horizontale component van de actieve gronddruk coëfficiënt:

$$K_{act,h} = \frac{\cos^2(\phi)}{(1 + \sqrt{\sin^2(\phi) + \sin\phi \cos\phi \tan\delta})^2}$$

Voor de actieve spanning (σ_{act}) kan geen waarde lager dan nul in rekening worden gebracht. Integratie van zowel de actieve als de passieve spanning over de hoogte van het schoot (Z) geeft de actieve (F_{act}) en passieve (F_{pas}) weerstand per meter breedte van het grondschoot.

De krachten kunnen als volgt worden berekend:

$$F_{pas} = \frac{1}{2} K_{pas,h} \cdot \sigma'_v \cdot Z + 2c \sqrt{K_{pas,h}} \cdot Z$$

En:

$$F_{act} = \frac{1}{2} K_{act,h} \cdot \sigma'_v \cdot Z - 2c \sqrt{K_{act,h}} \cdot Z$$

De netto weerstand per meter breedte schot is het verschil hiertussen:

$$F_{net} = F_{pas} - F_{act}$$

Het effect van de eindvlakken op de weerstand kan worden meegenomen met een schelffactor. Voorgesteld wordt om daarvoor de volgende factor te hanteren:

$$S = 1 + 0,25 \cdot B/Z$$

De trekkracht geleverd door het grondschot met een breedte (B) is dan gelijk aan:

$$F_{schot} = F_{net} \cdot B \cdot S$$

Bij variaties van de grondeigenschappen over de indringingsdiepte van het grondschot kan het zinvol zijn om daarmee rekening te houden bij het bepalen van de weerstand van het grondschot. Er kan dan gebruik worden gemaakt van een twee of drie lagen grondmodel.

Bij de berekening van de weerstand van het schot kan rekening worden gehouden met de toenemende indringingsdiepte van het schot gedurende de ontwikkeling van de trekkracht.

5.3 Wrijving lier

De wrijving vanuit het lier voertuig kan worden berekend als het gewicht van het voertuig bekend is. De wrijvingskracht is dan gelijk aan:

$$F_{lier} = f_{lier,opp} \cdot G_{lier}$$

Met

- G_{lier} Gewicht van het lier voertuig (kN).
- $f_{lier,opp}$ Wrijvingsfactor lier met ondergrond(-).

Voor de wrijvingsfactor kan $f_{lier,opp} = 0,25$ worden gebruikt. Deze waarde is van toepassing voor een situatie met of zonder rijplaten.

5.4 Totale trekkracht

De totale trekkracht die geleverd kan worden door de lier kan dan worden berekend door :

$$F_{trek} = F_{schot} + F_{lier}$$

Voor de ontwerpberekeningen moeten de van toepassing zijnde partiële factoren worden toegepast.

6 Berekening weerstand ploeg

6.1 Weerstand ploeg, algemeen

Zoals bepaald in paragraaf 4.4.1 wordt de weerstand die de ploeg (F_{ploeg}) ondervindt geleverd door de volgende onderdelen:

- Ripper shoe (F_{ripper}):
 - Doorsnijden grond.
 - Oplichten grond.
 - Wrijving langs boven- en onderzijde.
- Zwaard (F_{zwaard}):
 - Snijden grond.
 - Wrijving langs zijkant.
- Torpedo (F_{torpedo}) (indien aanwezig, niet altijd wordt er een torpedo gebruikt):
 - Weerstand tegen kop torpedo.
 - Wrijving langs zijkant.

In de volgende paragrafen wordt een eerste modellering voor het bepalen van deze krachten voorgesteld. Vooropgesteld wordt dat de geometrie van de ripper shoe met zwaard en torpedo zodanig is dat een exacte modellering alleen met een 3D eindige elementen model mogelijk is. Iedere andere modellering is een vergaande vereenvoudiging van de werkelijkheid en het resultaat is op zijn best indicatief.

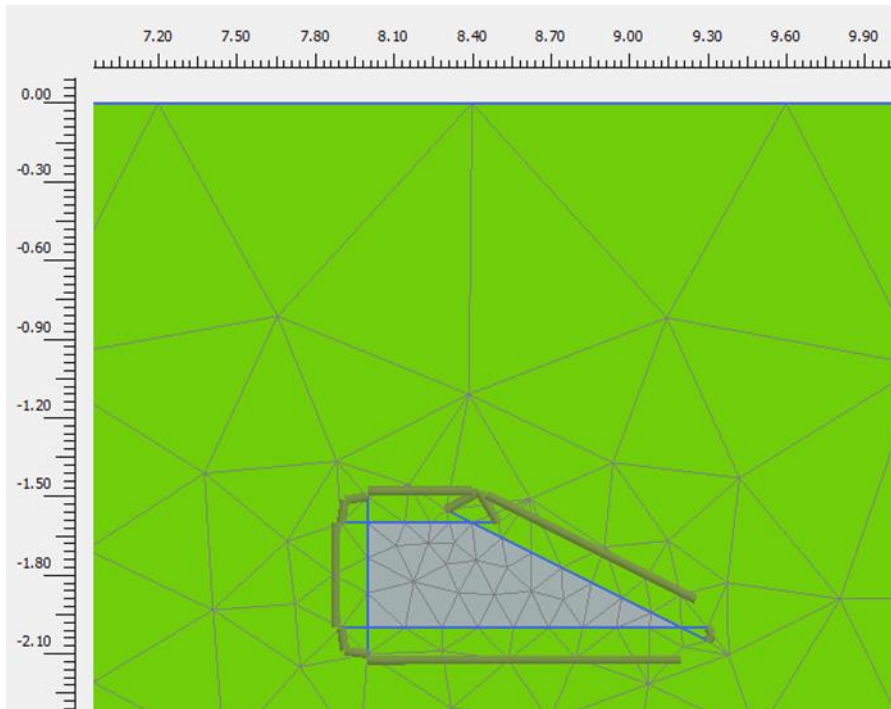
Een alternatieve benadering is om uit te gaan van de gemeten weerstand in verschillende grondsoorten. Dat vereist de nodige metingen bij praktijkprojecten. Binnen het kader van dit TKI project (FLIP) was het niet mogelijk om de hiervoor benodigde betrouwbare metingen te doen.

Om toch enig inzicht te krijgen in de weerstand, die de ploeg zelf ondervindt is voor de modelvorming de ploeg opgedeeld in een aantal afzonderlijke elementen zonder onderlinge interactie. Van elk deel (ripper shoe, zwaard en torpedo) is de bijdrage aan de weerstand bepaald. Dit is uitgewerkt in de volgende paragrafen. Sommatie van de verschillende bijdragen geeft dan een indicatie van de totale weerstand van de ploeg.

6.2 Weerstand ripper shoe

6.2.1 Keuze modellering

De weerstand van de ripper shoe kan worden benaderd met een EEM berekening waarin de geometrie van de ripper shoe sterk is vereenvoudigd. Figuur 6-1 geeft een voorbeeld hiervan. In dit type berekening worden de verschillende componenten, zoals snijden, oplichten en wrijving, gezamenlijk en met de onderlinge interactie berekend.



Figuur 6-1 Voorbeeld EEM berekening ripper shoe, met sterk vereenvoudigde geometrie.

Hieronder wordt voor een meer eenvoudige aanpak gekozen, waarbij de onderdelen wrijving, snijkraft en oplichten grond apart worden beschouwd.

6.2.2 Wrijvingscomponent

De wrijving bestaat uit de wrijving langs de onderkant en de bovenkant. Strikt genomen is er mogelijk ook sprake van wrijvingsweerstand langs de zijkant van de ripper shoe. De vorm van de ripper shoe is echter dat deze achter de snijtanden versmalt. Daardoor zal de gronddruk tegen de zijkant minimaal zijn en vanuit praktisch oogpunt verwaarloosd kunnen worden.

De wrijvingscomponent wordt berekend aan de hand van de schuifspanning:

$$\tau_{rip} = \sigma'_v \cdot \tan\delta + c \cdot f_{ad}$$

Met:

- f_{ad} Adhesie factor.
- δ Wandwrijvingshoek ripper shoe.
- σ'_v Effectieve verticale grondspanning op niveau van de ripper shoe.

Voor de verticale spanning op de boven- en onderkant van de ripper shoe kan dan de initiële verticale spanning op het niveau van respectievelijk de boven- en de onderkant worden gebruikt. Dit is een vereenvoudiging, want door het verplaatsen (verdringen) van de grond zullen deze verticale spanningen veranderen.

Voor een ripper shoe met de afmetingen $B_{rippershoe}$ (breedte) en $L_{rippershoe}$ (lengte) kan de wrijvingskracht geleverd door de ripper shoe worden berekend:

$$F_{w,rip} = \tau_{rip} \cdot B_{rippershoe} \cdot L_{rippershoe} \cdot 2$$

De factor 2 brengt in rekening dat zowel over de boven- als de onderzijde sprake is van wrijving.

6.2.3 Snijden van grond component

Bij de snijrand moet de grond worden doorsneden. Bestaande modellen voor het snijden van grond zijn afkomstig uit de baggerindustrie. Daarbij gaat het over ondiepe snijvlakken waarbij de grond na snijden wordt verwijderd. Van verwijderen is hier geen sprake, zodat deze modellen hier niet van toepassing zijn.

In zijn algemeenheid kan de weerstand die de grond op het front van de ripper shoe uitoefent om de grond los te kunnen snijden wordt berekend volgens:

$$F_{cut,rip} = \sigma_{cut,rip} \cdot d \cdot B$$

Met:

- $\sigma_{cut,rip}$ Weerstand snijrand.
- d Dikte snijrand ripper shoe.
- B Breedte ripper shoe.

De uitdaging is nu om een uitdrukking voor de weerstand van de snijrand ($\sigma_{cut,rip}$) te vinden. Pragmatisch wordt hiervoor de benadering voor een door grond horizontaal belaste paal (Brinch Hansen, Christensen 1961) gekozen. Dit geeft:

$$\sigma_{cut,rip} = K_q \cdot \sigma'_v \cdot (1 - \sin \phi) + c \cdot K_c$$

De horizontale kracht volgt dan uit de vermenigvuldiging van de frontale oppervlakte van de ploeg, dikte (d) maal breedte (B).

De grootte factoren K_q en K_c is voor een aantal combinaties van diepte en hoek van inwendige wrijving bepaald met de formules in (Brinch Hansen, Christensen 1961) De resulterende waarden zijn gegeven in Tabel 6-1 en Tabel 6-2.

Tabel 6-1 Waarde K_q , voor snijrand ripper shoe.

Diepte [m - mv]	Hoek van inwendige wrijving ϕ						
	0°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0,5	0	3,3	5,5	9,1	15,6	28,9	57,5
1	0	3,4	5,7	9,5	16,6	31,7	67,0
1,5	0	3,4	5,7	9,6	16,9	32,8	71,1
2	0	3,4	5,8	9,7	17,1	33,4	73,4
2,5	0	3,4	5,8	9,7	17,2	33,7	74,9
3	0	3,5	5,8	9,7	17,3	34,0	75,9
99	0	3,5	5,9	9,9	17,7	35,3	81,3

Tabel 6-2 Waarde K_c , voor snijrand ripper shoe.

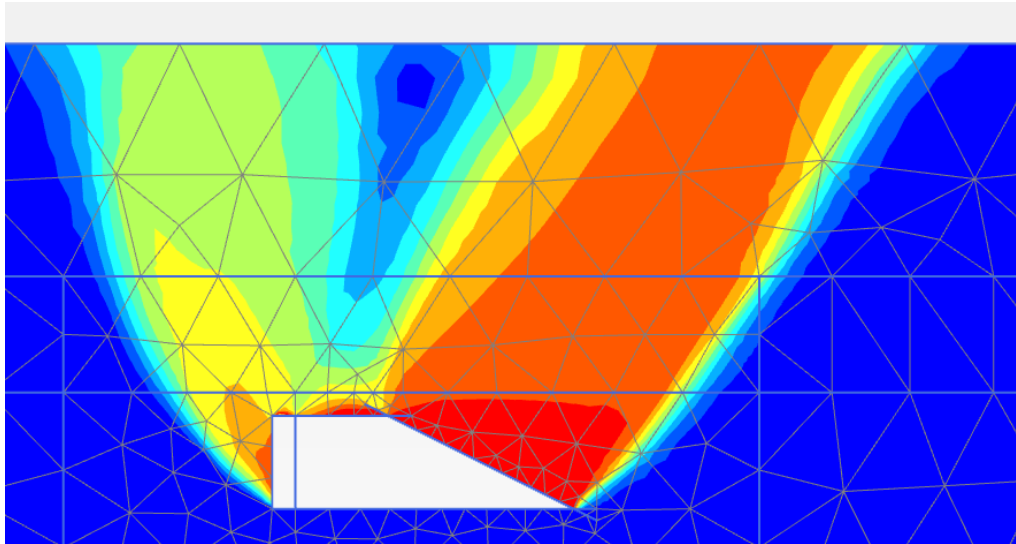
Diepte [m - mv]	Hoek van inwendige wrijving ϕ						
	0°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0,5	8,0	17,0	23,5	34,8	56,8	105,0	221,4
1	8,0	17,3	24,0	35,8	59,0	111,2	243,9
1,5	8,1	17,4	24,2	36,1	59,7	113,4	252,5
2	8,1	17,4	24,2	36,2	60,1	114,6	257,0
2,5	8,1	17,5	24,3	36,3	60,4	115,3	259,8
3	8,1	17,5	24,3	36,4	60,5	115,8	261,7
99	8,1	17,6	24,5	36,7	61,3	118,1	271,4

6.2.4 Omhoog drukken grond component

De kracht vanuit het omhoog drukken van de grond component wordt berekend door de wrijving en het gewicht van de grond component te beschouwen. Dit geeft drie componenten die de weerstand bepalen:

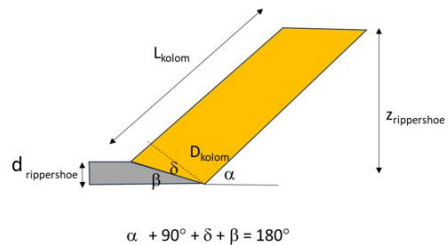
- Gewicht grond kolom op de ripper shoe.
- Wrijving langs schuin bezwijkvlak (τ_1).
- Wrijving op de zijvlakken afschuivende kolom (τ_2).

Om een beeld te krijgen van de mechanismen zijn er indicatieve berekeningen met PALXIS, versie 2023.2.0.2059 gemaakt. Uit deze berekeningen blijkt dat bij het snijden de grond voor de ripper shoe wordt opgetild. Dit optillen geeft schuifspanningen in de grond. Voor inzicht in de mechanismen is met PLAXIS een kwalitatieve berekening gemaakt. Figuur 6-2 laat het grondvervormingspatroon zien.



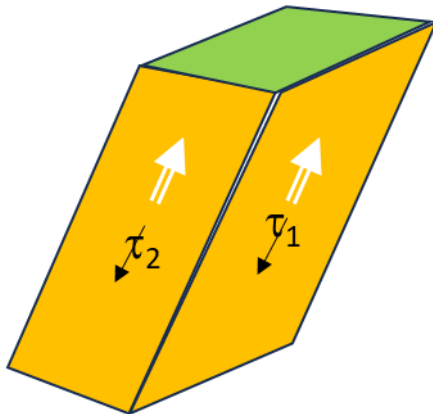
Figuur 6-2 Vervorming grond bij ripper shoe.

Uit Figuur 6-2 volgt dat er een kolom grond wordt weggedrukt die onder een kleine hoek met het snijvlak van de ripper shoe staat. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 6-3.



Figuur 6-3 Situatie weggedrukte grondkolom.

Voor de modelvorming wordt uitgegaan van een star volume grond dat wordt weggedrukt, zoals geïllustreerd in Figuur 6-4.



Figuur 6-4 Illustratie grondkolom.

De weerstand volgt nu uit de sommatie van de wrijving over deze 4 zijden. Deze component werkt loodrecht op het snijvlak, maar voor de weerstand is de horizontale component van belang.

Ter vereenvoudiging wordt aangenomen dat de kolom grond loodrecht op het snijvlak staat. Er wordt dus verondersteld dat $\delta = 0$. Hiermee zijn de lengte van de glijvlakken te berekenen.

De uitgedrukte grondkolom heeft vier zijden. Er geldt dan voor D_{kolom} en L_{kolom} :

$$D_{kolom} = d_{rippershoe} / \sin \beta$$
$$L_{kolom} = z_{rippershoe} / \sin \alpha$$

Met:

- $d_{rippershoe}$ dikte ripper shoe.
- β snijhoek ripper shoe met de horizontaal.

Voor een diepte halverwege de grondkolom ($Z = 1/2 z_{rippershoe}$) geldt:

$$\sigma'_{h,0.5} = \sigma'_{v,0.5} \cdot (1 - \sin \phi)$$

De normaalspanning loodrecht op het schuin staande vlak bedraagt dan:

$$\sigma'_n = 0,5 \cdot (\sigma'_v + \sigma'_h) + 0,5 \cdot (\sigma'_v - \sigma'_h) \cdot \cos (2 \cdot \beta)$$

De gemiddelde wrijving bedraagt dan:

$$\tau_1 = c + \sigma'_n \cdot \tan (\phi)$$

Deze werkt per vlak over een oppervlak van $L_{kolom} \cdot B_{rippershoe}$.

Met

- $B_{rippershoe}$ breedte van de ripper shoe loodrecht op de rijrichting.

Op de zijvlakken is de normaalspanning gelijk aan de horizontale spanning. De gemiddelde wrijving over dat vlak bedraagt:

$$\tau_2 = c + \sigma'_{h,0.5} \cdot \tan (\phi)$$

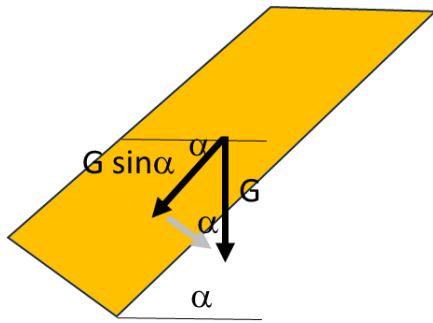
Deze werkt per vlak over een oppervlak van $L_{kolom} \cdot D_{kolom}$.

Het gewicht van de grondkolom bedraagt:

$$G_{kolom} = \gamma \cdot L_{kolom} \cdot D_{kolom} \cdot B_{rippershoe}$$

De component evenwijdig aan het bezwijkvlak is:

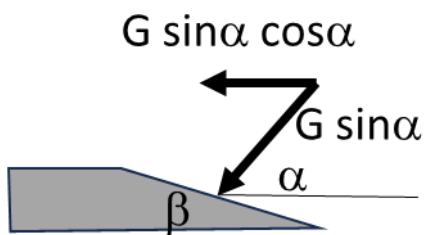
$$G_{kolom, //} = \gamma \cdot L_{kolom} \cdot D_{kolom} \cdot B_{rippershoe} \cdot \sin \alpha$$



Figuur 6-5 Gewichtscomponent afschuivende grondmoot.

Sommeren van deze weerstanden en rekening houdend met het feit dat alleen de horizontale component van belang is, geeft voor de weerstand van de ripper shoe:

$$F_{gr,rip} = [2 \cdot \tau_1 \cdot L_{kolom} \cdot B_{rippershoe} + 2 \cdot \tau_2 \cdot L_{kolom} \cdot D_{kolom} + G_{kolom, //}] \cdot \cos \alpha$$



Figuur 6-6 Bepaling horizontale component op snijvlak.

Zoals aangegeven is de voorgaande afleiding gebaseerd op het afschuiven van een star grondvolume. Verwacht wordt dat daarmee de weerstand wordt overschat. In Bijlage B is een afleiding beschreven voor deze overschatting. Op basis van de resultaten uit de bijlage wordt voorgesteld om voor de weerstand door het opdrukken van de grond een modelfactor van $\gamma_{model} = 0,9$ te gebruiken.

6.2.5 Totaal ripper shoe

De totale kracht vanuit de ripper shoe is dan als volgt te berekenen:

$$F_{ripper} = F_{gr,rip} + F_{w,rip} + F_{cut,rip}$$

Voor de ontwerpberekeningen moeten partiële factoren worden toegepast.

6.3 Zwaard

De weerstand van het zwaard (F_{zwaard}) bestaat uit een wrijvingscomponent en een component door het snijden van de grond. De gemiddelde weerstand van het zwaard wordt op de halve hoogte van het zwaard berekend (deze is gelijk aan de halve diepte van de ripper shoe).

6.3.1 Wrijvingscomponent

De wrijvingsweerstand tegen de zijkant van de van het zwaard volgt uit de integratie van de schuifweerstand op de zijkanten van het zwaard. :

$$F_{\text{fric,zwaard}} = 2 \cdot L_{\text{zwaard}} \cdot \int_{\text{maaiveld}}^{\text{top ripper shoe}} \tau_{\text{zwaard}}(z) dz$$

Hierin is:

- L_{zwaard} De lengte van het zwaard in de rijrichting (m).
- $\tau_{\text{zwaard}}(z)$ De schuifweerstand op zijkant zwaard op diepte z (m).
- mv Maaiveld (m).
- top ripper shoe x-coördinaat bovenkant ripper shoe (m).

De factor 2 brengt in rekening dat er 2 zijden van het zwaard zijn.

De schuifweerstand hangt af van het type grond en de diepte. In cohesieve gronden is het de adhesie tussen grond en staal. In niet cohesieve gronden volgt het uit de normaalspanning op het zwaard en de wandwrijvingshoek. In dat geval is:

$$\tau_{\text{zwaard}}(z) = K \cdot \sigma'_v(z) \cdot \tan \delta$$

Met:

- K Verhouding horizontale en verticale spanning, de waarde ligt tussen de neutrale gronddruk en de passieve gronddruk (-).
- $\sigma'_v(z)$ Effectieve verticale spanning op niveau z (kPa).
- δ Wandwrijvingshoek grond-staal ($^{\circ}$).

Bij homogene grond en verwaarlozing van het effect van verdringing volgt de gemiddelde schuifspanning uit:

$$\tau_{\text{zwaard}} = \sigma'_v (1 - \sin \phi) \cdot \tan \delta + c \cdot f_{ad}$$

Met:

- σ'_v Effectieve verticale spanning op halve diepte zwaard (kPa).
- ϕ Hoek van inwendige wrijving ($^{\circ}$).
- c Cohesie (kPa).
- f_{ad} Adhesie factor (-).
- δ Wandwrijvingshoek zwaard ($^{\circ}$).

Voor een zwaard met de afmetingen L (breedte loodrecht op de rijrichting) en H (hoogte, is afstand maaiveld tot bovenkant ripper shoe) kan de wrijvingskracht geleverd door het zwaard worden berekend:

$$F_{w,zwaard} = \tau_{\text{zwaard}} \cdot L_{\text{zwaard}} \cdot H_{\text{zwaard}} \cdot 2$$

Met:

- L_{zwaard} Afmeting zwaard in langsrichting.
- H_{zwaard} Hoogte zwaard, afstand tussen maaiveld en bovenkant ripper shoe.

De factor 2 brengt in rekening dat het zwaard twee zijden heeft.

6.3.2 Snijden van grond component

De weerstand die de grond op het front van het zwaard uitoefent om de grond los te kunnen snijden wordt berekend volgens:

$$F_{cut,zwaard} = \sigma_{cut,zwaard} \cdot d \cdot H_{zwaard}$$

Met:

- $\sigma_{cut,zwaard}$ Weerstand snijrand (kPa).
- d Dikte snijrand (m).
- H_{zwaard} Lengte zwaard, verticaal (m).

En:

$$\sigma_{cut,zwaard} = K_q \cdot \sigma'_h + c \cdot K_c$$

Voor de effectieve horizontale σ'_h wordt de neutrale waarde gebruikt, dus:

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot (1 - \sin \phi)$$

De horizontale kracht volgt dan uit de vermenigvuldiging van de frontale oppervlakte van het zwaard, dikte (d_{zwaard}) maal hoogte (H_{zwaard}).

De weerstand die de grond op het front van het zwaard uitoefent om de grond los te kunnen snijden wordt berekend aan de hand van de factoren K_c en K_q . Deze factoren zijn een functie van de diepte onder maaiveld. Ten behoeve van de berekeningen is voor een aantal combinaties van geometrie en grondsterkte de gemiddelde waarde van deze factoren bepaald. De hieruit resulterende waarden voor de factoren K_q en K_c zijn in Tabel 6-3 en Tabel 6-4 weergegeven.

Tabel 6-3 Gemiddelde waarde K_q , voor snijrand zwaard.

H _{zwaard} [m]	d [m]	K _q						
		φ=0°	φ=15°	φ=20°	φ=25°	φ=30°	φ=35°	φ=40°
1	0,12	0,0	2,5	4,0	6,1	9,4	14,6	23,2
1,5		0,0	2,7	4,3	6,8	10,6	17,0	27,8
2		0,0	2,8	4,6	7,2	11,5	18,9	31,6
2,5		0,0	2,9	4,7	7,5	12,2	20,3	34,9
3		0,0	3,0	4,9	7,8	12,7	21,6	37,8
1	0,15	0,0	2,4	3,8	5,8	8,8	13,5	21,1
1,5		0,0	2,6	4,1	6,4	9,9	15,7	25,1
2		0,0	2,7	4,4	6,9	10,8	17,4	28,6
2,5		0,0	2,8	4,6	7,2	11,5	18,9	31,6
3		0,0	2,9	4,7	7,5	12,1	20,1	34,3

Tabel 6-4 Gemiddelde waarde K_c , voor snijrand zwaard.

H _{zwaard} [m]	d [m]	K _c						
		φ=0°	φ=15°	φ=20°	φ=25°	φ=30°	φ=35°	φ=40°
1	0,12	6,2	11,9	15,6	21,2	30,5	46,5	74,4
1,5		6,6	13,0	17,2	23,8	35,2	55,7	93,6
2		6,8	13,6	18,2	25,6	38,4	62,4	108,6
2,5		7,0	14,1	18,9	26,8	40,8	67,6	120,8
3		7,1	14,5	19,5	27,8	42,7	71,7	130,9
1	0,15	6,0	11,3	14,6	19,7	27,9	41,7	65,1
1,5		6,4	12,4	16,3	22,4	32,6	50,5	82,7
2		6,6	13,1	17,4	24,2	35,9	57,2	96,9
2,5		6,8	13,6	18,2	25,6	38,4	62,4	108,6
3		6,9	14,0	18,8	26,6	40,4	66,7	118,6

Voor granulaire gronden kan de wandwrijvingshoek worden bepaald door de helft van de hoek van inwendige wrijving te nemen.

6.3.3 Totaal Zwaard

De totale kracht door het zwaard geleverd kan dan worden berekend:

$$F_{\text{zwaard}} = F_{w,\text{zwaard}} + F_{\text{cut},\text{zwaard}}$$

Voor de ontwerpberekeningen moeten partiële factoren worden toegepast.

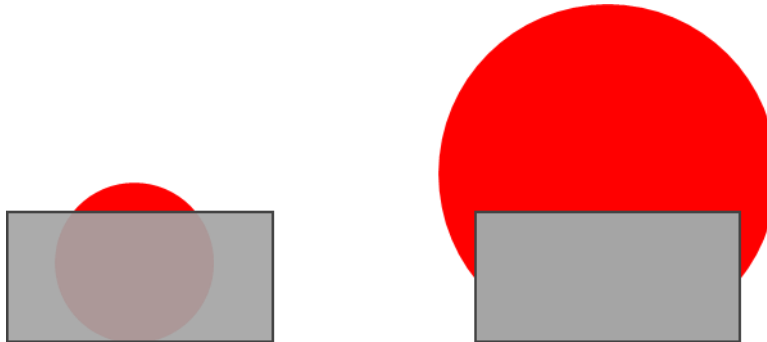
6.4 Torpedo

De weerstand van de torpedo (F_{torpedo}) bestaat uit een wrijvingscomponent en een component door het verdringen van de grond.

6.4.1 Weerstand op voorkant torpedo

De bijdrage van de verdringingscomponent is afhankelijk van de afmetingen van de torpedo en van de ripper shoe.

Voor kleine diameter torpedo's ($D_{\text{torpedo}} < d_{\text{rippershoe}}$) ligt de torpedo geheel in de schaduw van de ripper shoe en kan worden verondersteld dat er de kop van de torpedo geen weerstand geeft. Bij grotere diameters van de torpedo ligt een deel niet in de schaduw van de ripper shoe en is er wel sprake van een bijdrage aan de weerstand. Deze hangt af van het netto oppervlak dat niet in de schaduw van de ripper shoe ligt.



Figuur 6-7 Illustratie schaduwwerking ripper shoe; links voor een kleine diameter torpedo en rechts voor een grote diameter torpedo.

Een eenvoudige benadering die voor alle situaties geldt is niet te geven. Voor een grote diameter torpedo ($D_{\text{torpedo}} > 2 \cdot d_{\text{rippershoe}}$) kan de onderstaande benadering voor het bepalen van het netto oppervlak worden gevolgd.

De straal van de torpedo (R_{torpedo}) en de maximale dikte van de ripper shoe ($d_{\text{rippershoe}}$) zijn van belang. Er wordt vanuit gegaan dat de breedte van de ripper shoe altijd groter of gelijk is aan de diameter van de torpedo. Op basis van dit uitgangspunt is de verdringingsoppervlakte een deel van de torpedo oppervlakte :

$$A_{\text{ver}} = \pi \cdot R_{\text{torpedo}}^2 - \frac{1}{2} \cdot R_{\text{torpedo}}^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha)$$

Met

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \left(\frac{R_{\text{torpedo}} - d_{\text{rippershoe}}}{R_{\text{torpedo}}} \right)$$

De verdringingskracht kan dan worden berekend:

$$F_{\text{ver,tor}} = (\sigma'_v \cdot K_{\text{pas}} + 2 \cdot c_u) \cdot A_{\text{ver}}$$

6.4.2 Wrijvingscomponent

De wrijvingscomponent wordt berekend aan de hand van de schuifspanning:

$$\tau_{\text{tor}} = \sigma'_{\text{rad}} \cdot \tan \delta + c \cdot f_{\text{ad}}$$

Met:

- f_{ad} adhesie factor (-).
- δ wandrijvingshoek torpedo ($^{\circ}$).

De gemiddelde normaalspanning $\sigma'_{n,avg}$ is het gemiddelde van de normaalspanning op de bovenkant, de twee zijanten en de onderkant van de torpedo.

$$\sigma'_{rad,avg} = \frac{\sigma'_{v,top} + 2 \cdot K \cdot \sigma'_{v,zij} + \sigma'_{v,onder}}{4}$$

Omdat de grond zijdelings wordt verdrongen zal de spanning groter zijn dan volgt uit de verticale en horizontale grondspanning. De ondergrens wordt gevormd door wel uit te gaan van de grondspanningen in niet vervormde situatie.

Voor een torpedo met de afmetingen $D_{torpedo}$ (diameter) en $L_{torpedo}$ (lengte torpedo) kan de wrijvingskracht geleverd door de torpedo worden berekend:

$$F_{w,tor} = \tau_{tor} \cdot L_{torpedo} \cdot \pi \cdot D_{torpedo}$$

Belangrijk voor het bepalen van de wandwrijving is de radiale spanning op de torpedo. Door de combinatie van de ripper shoe en torpedo wordt de grond verdrongen. Welk deel hiervan afkomstig is van de torpedo hangt af van de afmetingen van de ripper shoe en van de torpedo. Dit is vergelijkbaar aan de situatie bij het bepalen van de weerstand op de voorkant van de torpedo.

In de volgende afleiding wordt uitgegaan van het intrekken van grote diameter leidingen, dus van de situatie dat de torpedo groter is dan de ripper shoe.

Aan de bovenkant van de torpedo wordt grond omhoog gedrukt. De druk op de bovenkant zal dan hoger zijn dan de neutrale gronddruk. Conform NEN 3650 wordt dit effect in rekening gebracht met de methode Marston.

De verticale spanning op de bovenkant van de torpedo volgt dan uit:

$$\sigma'_{v,top} = \sigma'_{v,n} \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_{torpedo}} \right)$$

Met:

- $\sigma'_{v,top}$ Effectieve verticale spanning op bovenkant torpedo (kPa).
- $\sigma'_{v,n}$ Neutrale effectieve verticale spanning op niveau bovenkant torpedo (kPa).
- f_m Coëfficiënt voor correctie gronddruk volgens Marston (-).
- H Gronddekking (m).
- $D_{torpedo}$ Buitendiameter torpedo (m).

In NEN-3650 wordt voor de waarde van f_m gegeven: 0,3.

Het gewicht van de torpedo wordt deels opgevangen door de bevestiging aan de ploeg. De effectieve spanning op de onderkant van de torpedo wordt daarom gelijk genomen aan die op de bovenkant.

$$\sigma'_{v,onder} = \sigma'_{v,top}$$

Voor de radiale spanning tegen de zijkant wordt de situatie ter hoogte van de hartlijn van de leiding als representatief voor de gemiddelde radiale spanning over de zijkant beschouwd. Dit geeft:

$$\sigma'_{zij} = \sigma'_h = K \cdot \sigma'_{v0}$$

Met:

- σ'_h Radiale spanning tegen zijkant (kPa).
- σ'_h Horizontale spanning tegen zijkant (kPa).
- σ'_{v0} Effectieve verticale grondspanning ter hoogte hart leiding (kPa).
- K Gronddrukcoëfficiënt (-).

Aan de zijkant van de torpedo wordt grond weggedrukt. Daarom wordt hier uitgegaan van de passieve gronddruk. Daarmee wordt de uitdrukking voor de horizontale gronddruk:

$$\sigma'_h = \sigma'_{v0} \cdot \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) + 2c \cdot \sqrt{\left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)}$$

De gemiddelde radiale spanning volgt uit middeling van de verschillende componenten:

$$\sigma'_{rad} = \frac{\sigma'_{v,top} + 2 \cdot \sigma'_{zij} + \sigma'_{v,onder}}{4} = \frac{\sigma'_{v,top} + \sigma'_{zij}}{2}$$

De wrijvingscomponent wordt berekend aan de hand van de schuifspanning:

$$\tau_{tor} = \frac{\sigma'_{v,top} + \sigma'_{zij}}{2} \cdot \tan \delta + c \cdot f_{ad}$$

Voor een torpedo met de afmetingen $D_{torpedo}$ (diameter) en $L_{torpedo}$ (lengte torpedo) volgt de wrijvingsweerstand van de torpedo dan uit:

$$F_{w,tor} = \tau_{tor} \cdot L_{torpedo} \cdot \pi \cdot D_{torpedo}$$

6.4.3 Totaal Torpedo

De totale kracht door de torpedo geleverd kan dan worden berekend:

$$F_{torpedo} = F_{w,tor} + F_{ver,tor}$$

6.5 Totale Ploeg kracht

De totale weerstand biedende kracht van de ploeg is dan gelijk aan:

$$F_{ploeg} = F_{ripper} + F_{zwaard} + F_{torpedo}$$

7 Berekening weerstand leiding

7.1 Algemeen

Voor de modellering van de grondweerstand wordt uitgegaan van de wrijving langs de leiding. De weerstand is:

$$\tau_{max} = a + \sigma'_{rad} \cdot \tan(\delta).$$

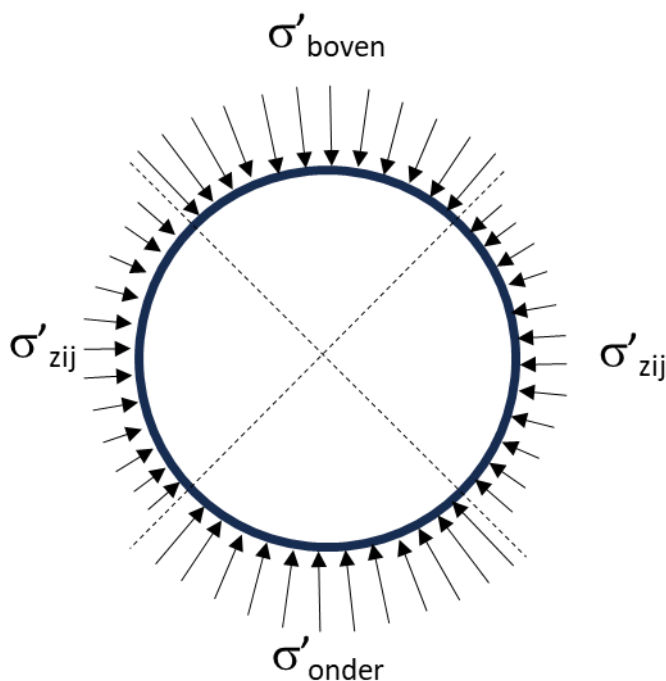
Met:

- τ_{max} Schuifweerstand (kPa).
- a Adhesie (kPa).
- σ'_{rad} Radiale spanning (kPa).
- δ Wandwrijvingshoek ($^{\circ}$).

De radiale spanning varieert over de omtrek. Voor het bepalen van de radiale spanning kunnen de volgende zone's worden onderscheiden:

- Bovenkant leiding (σ_{boven}).
- Zijkant leiding (links en rechts) (σ_{zij}).
- Onderkant leiding (σ_{onder}).

Figuur 7-1 geeft de geschematiseerde verdeling van de radiale spanning op de leiding weer.



Figuur 7-1 Radiale spanning op leiding, schematisch.

De gemiddelde radiale spanning op de leiding is:

$$\sigma'_{rad} = \frac{\sigma'_{top} + 2 \cdot \sigma'_{h} + \sigma'_{ond}}{4}$$

In de volgende paragrafen wordt voor de aanlegfase en de bedrijfsfase aangegeven hoe de verschillende componenten van de radiale spanning bepaald kunnen worden.

7.2 Modellerings axiale weerstand leiding bij de aanlegfase

Door de grotere diameter van de torpedo zal de grond achter de torpedo iets willen inzakken. Voor de gronddruk op de bovenkant van de leiding wordt daarom uitgegaan van de gronddruk volgens de theorie van gewelfwerking volgens Terzaghi. Omdat er sprake is van een kortdurende situatie hoeft geen rekening te worden gehouden met consolidatie van kleilagen naast de leiding.

Voor de gronddruk op de leiding kan daarom de volgende formule worden gebruikt:

$$\sigma_{n,r} = \frac{B_1 \cdot \left(\gamma' - \frac{c}{B_1} \right)}{K \cdot \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{K \cdot \tan \phi \cdot h}{B_1}} \right)$$

$$B_1 = \left[D_0 \cdot \left(\frac{1}{2} + \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \right) \right]$$

Met:

- $\sigma_{n,r}$ Gereduceerde neutrale druk [kN/m²].
- K_0 Gronddruk coefficient [-].
- ϕ Hoek van inwendige wrijving [°].
- c Cohesie [kN/m²].
- γ' Effectief volume gewicht grond [kN/m³].
- h Gronddekking, afstand tussen maaiveld en bovenkant leiding [m].

Indien de leiding onder het grondwater ligt en het effectief gewicht van de leiding minder is dan water (dus de situatie dat de leiding wil opdrijven) is de ondergrens voor de druk de kracht die nodig is om opdrijven te voorkomen. Deze druk volgt dan uit:

$$\sigma_{opw} = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \gamma_w - G_{leiding}}{D}$$

Met:

- $G_{leiding}$ Het gewicht van de leiding per strekkende meter tijdens intrekken [kN/m].
- D Buitendiameter van de leiding [m].
- γ_w Volumiek gewicht grondwater [kN/m³].

De maximum waarde van σ_{opw} en $\sigma'_{n,r}$ is aan de bovenzijde van de leiding σ'_{top} van toepassing.

De gronddruk op de onderkant van de leiding volgt uit het verticaal evenwicht van de leiding. Eventuele wrijving op de leiding in verticale richting wordt verwaarloosd. In verticale richting werken de effectieve spanning op de bovenkant van de leiding en het effectief gewicht van de leiding. De radiale spanning op de onderkant van de leiding volgt dan uit:

$$\sigma'_{ond} = \sigma'_{top} + G'/D$$

Met:

- σ_{ond} Radiale spanning tegen onderkant leiding.
- σ_{top} Radiale spanning tegen bovenkant leiding.
- G' Effectief gewicht leiding, $G' = G - 0,25 \cdot \pi \cdot D^2$ [kN/m].

Uiteraard kan deze spanning niet kleiner zijn dan nul.

Aan de zijkant van de leiding moet de grond terugkomen. De situatie ter hoogte van de hartlijn van de leiding wordt als representatief voor de gemiddelde radiale spanning over de zijkant beschouwd. Dit geeft:

$$\sigma'_{zij} = \sigma'_h = K \cdot \sigma'_{v0}$$

Met:

- σ'_h Radiale spanning tegen zijkant (kPa).
- σ'_h Horizontale spanning tegen zijkant (kPa).
- σ'_{v0} Effectieve verticale grondspanning ter hoogte hart leiding (kPa).
- K Gronddrukcoëfficiënt (-).

Voor de gronddrukcoëfficiënt kan voor de fase van intrekken de actieve gronddrukcoëfficiënt worden gebruikt. Daarmee wordt de uitdrukking voor de horizontale gronddruk:

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right)$$

De gemiddelde spanning op de leiding volgt dan:

$$\sigma'_{gem} = (2 \cdot \sigma'_h + \sigma'_{\text{ond}} + \sigma'_{\text{top}}) / 4$$

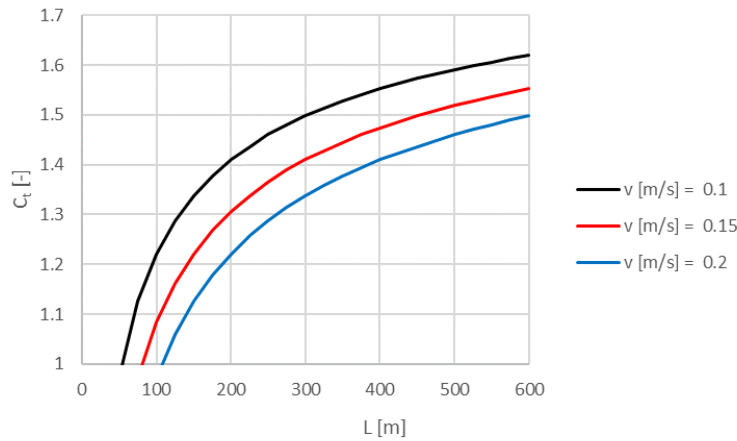
De wrijvingsspanning is daarmee:

$$\tau_{leiding} = \sigma'_{gem} \cdot \tan \delta + a$$

De wrijvingskracht langs de leiding met een lengte (L) en een diameter (D) volgt dan uit:

$$F_{leiding} = \tau_{leiding} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot C_t$$

De tijdsfactor C_t brengt de toename van de wrijving in de tijd door kruip van de grond in rekening. Voor de installatiefase kan worden de waarde van C_t worden afgelezen uit Figuur 7-2.



Figuur 7-2 Tijdsfactor C_t als functie van leidinglengte en intreksnelheid.

Als rekening gehouden moet worden met een periode van stilstand tijdens het intrekken (van meer dan 1 uur) moet voor het weer lostrekken van de leiding voor C_t worden gekozen: $C_t = 1,8$. Voor een stilstand periode korter dan een uur geldt $C_t = 1,5$.

Voor ontwerpberekeningen moet op F_{leiding} nog een partiële factor worden toegepast.

7.3 Modelling axiale weerstand leiding bij de bedrijfsfase

Voor de gebruiksfase wordt als basis ook bovenstaand model gebruikt. Voor de gebruiksfase kan worden verondersteld dat de effecten van grondverdringing tijdens het inploegen kruip zijn opgetreden en dat de grondspanningen weer de spanningen in de ongestoorde situatie hebben bereikt.

Dit betekent dat de formules uit de vorige paragraaf kunnen worden gebruikt met de volgende aanpassingen

- De verticale gronddruk is de neutrale gronddruk, boogwerking wordt verwaarloosd (dit is mogelijk conservatief, maar door de beperkte diepte van de leidingen bij ploegen van ongeveer 2 m is bij de meeste leidingen $H/D < 8$ en mag volgens de huidige regels geen gewelfwerking niet meegenomen worden).
- De horizontale gronddruk tegen de leiding volgt uit de neutrale gronddruk, dus $K_0 = 0,5$.
- Voor het gewicht van de leiding moet worden gerekend met een gevulde leiding, het gewicht van de vulling hangt af van het te transporteren medium.
- Er hoeft geen aparte tijdsfactor op de weerstand in rekening te worden gebracht, het tijdseffect wordt geacht te zijn verdisconteerd in de gebruikte parameters.

De gronddruk op de bovenkant van de leiding is de neutrale gronddruk:

$$\sigma_{v,n} = \sigma'_v + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{8}\pi\right) \cdot D_0 \cdot \gamma'$$

Met:

- σ'_v Verticale effectieve spanning op niveau bovenkant buis [kN/m^2].
- D_0 Diameter van de leiding [m].
- γ' Effectief volume gewicht [kN/m^3].

Indien de leiding onder het grondwater ligt en het effectief gewicht van de leiding minder is dan water (dus de situatie dat de leiding wil opdrijven) is de ondergrens voor de druk de kracht die nodig is om opdrijven te voorkomen. Deze druk volgt dan uit:

$$\sigma_{opw} = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot D_o^2 \cdot \gamma_w - G_{leiding}}{D_o}$$

Met:

- $G_{leiding}$ Het gewicht van de leiding per strekkende meter tijdens intrekken [kN/m].
- D_o Buitendiameter van de leiding.
- γ_w Volumegewicht grondwater [kN/m³].

De maximum waarde van σ_{opw} en $\sigma'_{n,r}$ is aan de bovenzijde van de leiding σ'_{top} van toepassing.

De gronddruk op de onderkant van de leiding volgt uit het verticaal evenwicht van de leiding. Eventuele wrijving op de leiding in verticale richting wordt verwaarloosd. In verticale richting werken de effectieve spanning op de bovenkant van de leiding en het effectief gewicht van de leiding. De radiale spanning op de onderkant van de leiding volgt dan uit:

$$\sigma'_{ond} = \sigma'_{top} + G'/D$$

Met

- σ_{ond} Radiale spanning tegen onderkant leiding.
- σ_{top} Radiale spanning tegen bovenkant leiding.
- G' Effectief gewicht leiding.

$$G' = G_{leiding} - 0,25 \cdot \pi \cdot D_o^2 \cdot \gamma_w$$

Uiteraard kan deze spanning niet kleiner zijn dan nul.

Opgemerkt moet worden dat bovenstaande uitdrukking voor het effectief gewicht van de leiding alleen geldt indien de stijghoogte in de ondergrond hydrostatisch is. In situaties waarin er sprake is van een opwaartse stroming is de opwaartse kracht op de leiding ook groter en daardoor het effectief gewicht lager. Hier moet in voorkomende situaties rekening worden gehouden.

Voor de gronddruk tegen de zijkant van de leiding wordt de neutrale gronddruk gebruikt. Hiervoor geldt, bij een neutrale gronddrukcoëfficiënt van $K_0 = 1 - \sin \phi$:

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot (1 - \sin \phi)$$

De gemiddelde radiale spanning is dan:

$$\sigma'_{gem} = (2 \cdot \sigma'_h + \sigma'_{top} + \sigma'_{ond}) / 4$$

De wrijvingsspanning is daarmee:

$$\tau_{leiding} = \sigma'_{gem} \cdot \tan \delta + a$$

Er wordt geen tijdsfactor C_t in rekening gebracht, het lange termijn tijdseffect is aanwezig in de gegeven aanpassingen.

De wrijvingskracht langs de leiding die met een lengte (L) en een diameter (D), ongeveer 100 dagen na aanleg, volgt dan uit:

$$F_{leiding} = \pi \cdot D_{leiding} \cdot L_{leiding} \cdot \tau_{leiding}$$

Voor ontwerpberekeningen moet hierop nog een partiële factor worden toegepast.

8 Conclusie en aanbevelingen

8.1 Samenvatting en conclusies

Grote diameter leidingen in landelijk gebied worden meestal aangelegd in een gegraven sleuf. Dit heeft het nodige grondverzet tot gevolg. Een alternatieve aanlegmethode is het zogenaamde 'inploegen' van leidingen. Om deze methode te kunnen toepassen voor grote diameter leidingen is het onderzoek FLIP (Fast Low cost Installation of Pipelines) opgestart. Onderdeel hiervan is het opstellen van een methode om de benodigde trekkrachten bij de installatie van de leidingen te bepalen.

Voor het bepalen van de aanlegkrachten bij inploegen zijn twee modellen opgesteld. Het eerste model beschouwd de weerstand die de ploeg zelf levert tijdens het inploegen. Het tweede model kan worden gebruikt om de weerstand die de in te trekken leiding levert tijdens het inploegen te berekenen.

Het model voor de weerstand van de ploeg zelf is gebaseerd op een sommatie van de weerstand van de verschillende onderdelen van de ploeg. Dat zijn de ripper shoe, het zwaard en de torpedo achter de ploeg. Ook wordt de berekening van de trekkracht die wordt geleverd door het grondreactieshot beschouwd. In het rapport wordt de afleiding van de formules voor de verschillende onderdelen gegeven.

Het model voor de weerstand van de leiding bij intrekken is gebaseerd op de totale wrijvingsweerstand langs de leiding. Het model is gevalideerd met behulp van de resultaten van uitgevoerde proeven op prototype schaal. Bij die metingen is geconstateerd dat tijdseffecten tijdens het inploegen niet verwaarloosbaar zijn. Het model voor de berekening van de wrijvingsweerstand langs de leiding is daarom uitgebreid, zodat de tijdseffecten kunnen worden meegenomen. In het rapport wordt een toelichting gegeven op de afleiding van de formules voor de weerstand tijdens intrekken en de wijze waarop het tijdseffect meegenomen kan worden in de berekeningen. Tevens zijn formules gegeven voor de berekening van de wrijvingsweerstand van de leiding tijdens de bedrijfsfase. Voor berekeningsdoeleinden zijn de formules uitgeschreven in Bijlage A van dit rapport.

8.2 Aanbevelingen

Bij het opstellen van de modellen zijn een aantal benaderingen en vereenvoudigingen gebruikt. Met de nu beschikbare metingen is het niet mogelijk gebleken om alle onderdelen van de modellen te valideren. Met name voor de validatie van de onderdelen waarmee de weerstand van de ploeg en het grondreactieshot wordt berekend ontbreken momenteel bruikbare meetgegevens. Voor de validatie van deze onderdelen van de modellering zijn betrouwbare meetgegevens dringend gewenst.

Bij komende projecten worden daarom minimaal de volgende metingen aanbevolen:

- Continue meting van de kracht in de kabel waarmee de ploeg wordt voortgetrokken.
- Gelijktijdig continue meting van de kracht aan het begin van de leiding.

Het verschil geeft dan de weerstand van de ploeg.

Een alternatief is om de weerstand van de ploeg zonder leiding te meten bij verschillende grondsoorten en bij verschillende diepte afstelling van de ripper shoe.

Dit heeft een aantal voordelen:

- De meting van de weerstand van de ploeg heeft geen invloed op de eigenlijke uitvoering van het inploegen van de leiding.
- De krachten op de loadcel waarmee de kracht in de kabel wordt gemeten zijn minder groot dan tijdens het inploegen.
- Er kan eenvoudig gevarieerd worden met de diepte afstelling van de ripper shoe, zodat de invloed daarvan op de weerstand gemeten wordt.

Daarnaast wordt aanbevolen om EEM berekeningen van de ploeg uit te voeren. Deze dienen om een beter inzicht in de optredende mechanismen en de onderlinge interactie daarvan te krijgen. Gezien de geometrie zullen dit 3D berekeningen moeten zijn. Bij voorkeur wordt hierbij ook een model gebruikt dat geschikt is voor grote vervormingen. Na validatie van het model kan met die berekeningen ook de invloed van variatie van grondslag, grondwaterstand en diepte afstelling van de ripper shoe worden beschouwd.

In het model voor de weerstand van de leiding tijdens intrekken is een tijdsfactor opgenomen. Deze is gebaseerd op de gemeten toename van de intrekkracht tijdens een periode van stilstand. Het model is niet gevalideerd voor de situatie dat leiding praktisch continu wordt ingetrokken.

Om dat aspect nader te onderzoeken en daarvoor het tijdseffect beter te kunnen kwantificeren wordt het volgende onderzoek voorgesteld:

- Onderzoek naar het tijdseffect op de leidingweerstand door:
 - Metingen bij verschillende projecten.
- Onderzoek naar de ontwikkeling van de ontwikkeling van de radiale spanning op de leiding in de tijd door:
 - Meting van de gronddrukken op de leiding tijdens intrekken; dit kan door het plaatsen van radiale drukopnemers aan het begin van de leiding en deze continu te meten.
 - Numeriek of analytisch onderzoek naar de ontwikkeling van de radiale spanning op de leiding in de tijd; hierbij zal met name aandacht besteed worden aan het effect van kruip van de grond direct achter de torpedo om de oversnijding door de torpedo op te vullen.

A Ontwerp berekeningen

A.1 Overzicht krachten

Uit het factueel rapport met de beschrijving van de ploegmethode volgt dat de volgende componenten een rol spelen in de krachtswerking bij leiding installatie:

- Te leveren trekkracht (F_{trek}):
 - Grondschoot.
 - Wrijving lier-ondergrond.
 - Tractie ploeg (is verwaarloosbaar).
- Weerstandskrachten ploeg (F_{ploeg}):
 - Ripper shoe:
 - Snijden en omhoogdrukken grond.
 - Wrijving ripper shoe – grond langs boven- en onderkant.
 - Wrijving zijkant ripper shoe met grond (is verwaarloosbaar).
 - Zwaard:
 - Snijden grond.
 - Wrijving zijkant blad-grond.
 - Torpedo, kop (niet altijd een torpedo aanwezig):
 - Verdringen grond (meestal verwaarloosbaar omdat torpedo gedeeltelijk in schaduw van ripper shoe en zwaard ligt).
 - Wrijving langs zijkant torpedo.
- Weerstand biedende kracht leiding (F_{leiding}):
 - Wrijving langs leiding.
 - Buiging leiding bij intreklocatie (niet beschouwd in dit rapport).

De te leveren trekkracht dient groter te zijn dan de weerstand biedende krachten:

$$F_{\text{trek}} > F_{\text{ploeg}} + F_{\text{leiding}}$$

A.2 Trekracht

De te leveren trekkraft door de Lier kan worden berekend met de reactie kracht vanuit het grondschot, de wrijving van de lier met de ondergrond verminderd met de tractie van de ploeg. De tractie van de ploeg wordt in de berekening op conservatieve wijze verwaarloosd.

A.2.1 Grondschot

De reactie druk vanuit het grondschot bestaat uit een passieve en een actieve component. De passieve weerstand (spanning) kan worden berekend door:

$$\sigma_{pas} = K_{pas,h} \cdot \sigma'_v + 2c \sqrt{K_{pas,h}}$$

Waarbij:

Met:

- $K_{pas,h}$ Horizontale component van de passieve gronddruk coëfficiënt:

$$K_{pas,h} = \frac{\cos^2(\phi)}{(1 - \sqrt{\sin^2(\phi) + \sin\phi \cos\phi \tan\delta})^2}$$

Met:

- ϕ Hoek van inwendige wrijving ($^\circ$).
- δ Wandwrijvingshoek ($^\circ$).
- σ'_v Effectieve verticale spanning op de halve hoogte van het schot (kPa).

Voor granulaire gronden kan de wandwrijvingshoek worden bepaald door de helft van de hoek van inwendige wrijving te nemen.

De actieve weerstand (spanning) op het grondschot kan worden berekend door:

$$\sigma_{act} = K_{act,h} \cdot \sigma'_v - 2c \sqrt{K_{act,h}}$$

Waarbij:

- $K_{act,h}$ horizontale component van de passieve gronddruk coëfficiënt:

$$K_{act,h} = \frac{\cos^2(\phi)}{(1 + \sqrt{\sin^2(\phi) + \sin\phi \cos\phi \tan\delta})^2}$$

Voor de actieve spanning (σ_{act}) mag geen waarde lager dan nul in rekening worden gebracht. Integratie van zowel de actieve als de passieve spanning over de hoogte van het schot (Z) geeft de actieve (F_{act}) en passieve (F_{pas}) weerstand per meter breedte van het grondschot.

De krachten kunnen als volgt worden berekend:

$$F_{pas} = \frac{1}{2} K_{pas,h} \cdot \sigma'_v \cdot Z + 2c \sqrt{K_{pas,h}} \cdot Z$$

En

$$F_{act} = \frac{1}{2} K_{act,h} \cdot \sigma'_v \cdot Z - 2c \sqrt{K_{act,h}} \cdot Z$$

De netto weerstand per meter breedte schot is het verschil hiertussen:

$$F_{net} = F_{pas} - F_{act}$$

Het effect van de eindvlakken op de weerstand kan worden meegenomen met een schelffactor. Voorgesteld wordt om daarvoor de volgende factor te hanteren:

$$S = 1 + 0,25 \cdot Z/B$$

Met:

- Z Diepte schot onder maaiveld.
- B Breedte schot.

De trekkracht geleverd door het grondschoot met een breedte (B) is dan gelijk aan:

$$F_{schot} = F_{net} \cdot B \cdot S$$

Bij variaties van de grondeigenschappen over de indringingsdiepte van het grondschoot kan het zinvol zijn om daarmee rekening te houden bij het bepalen van de weerstand van het grondschoot. Er kan dan gebruik worden gemaakt van een twee of drie lagen grondmodel.

Bij de berekening van de weerstand van het schot kan rekening worden gehouden met de toenemende indringingsdiepte van het schot gedurende de ontwikkeling van de trekkracht (De maximale waarde van Z is groter dan de begin waarde).

A.2.2 Wrijving lier

De wrijving vanuit het lier-voertuig kan worden berekend als het gewicht van het voertuig bekend is. De wrijvingskracht is dan gelijk aan:

$$F_{lier} = f_{lier,opp} \cdot G_{lier}$$

Met

- G_{lier} Gewicht van het lier voertuig (KN).
- $f_{lier,opp}$ Wrijvingsfactor lier met ondergrond.

Voor de wrijvingsfactor kan $f_{lier,opp} = 0,25$ worden gebruikt. Deze waarde is van toepassing voor een situatie met of zonder rijplaten.

A.2.3 Totale trekkracht

De totale trekkracht kan dan worden berekend door :

$$F_{trek} = (F_{schot} + F_{lier}) / f_t$$

De waarde van de partiele factor f_t moet nog worden vastgesteld.

A.3 Ploeg

De weerstandskrachten van de ploeg (F_{ploeg}) worden geleverd door

- Ripper shoe (F_{ripper}).
- Zwaard (F_{zwaard}).
- Torpedo (F_{torpedo}) (indien aanwezig, niet altijd wordt er een torpedo gebruikt).

De wrijving van de ploeg zelf wordt door de tractie van de ploeg niet meegenomen in beschouwing

A.3.1 Ripper shoe

De weerstand van de ripper shoe (F_{ripper}) bestaat uit een wrijvingscomponent en een component die zijn oorsprong vindt in het snijden en omhoog drukken van de grond.

A.3.1.1. Wrijvingscomponent

De wrijvingscomponent wordt berekend aan de hand van de schuifspanning:

$$\tau_{rip} = \sigma'_v \cdot \tan\delta + c \cdot f_{ad}$$

Met:

- f_{ad} Adhesie factor (-) voor cohesieve gronden boven de A-lijn uit het plasticiteitsdiagram geldt $f_{ad}=0,9$ en voor overige cohesieve gronden geldt $f_{ad}=0,7$.
- δ Wandwrijvingshoek ripper shoe ($^\circ$) voor granulaire grondsoorten geldt $\delta/\phi = 2/3$, voor cohesieve grondsoorten geldt $\delta/\phi = 1/2$, maar als de cohesieve grondsoorten organisch materiaal bevatten (meer dan 5 %) geldt $\delta/\phi = 1/4$.
- σ'_v Effectieve verticale grondspanning op niveau van de ripper shoe (kPa).

Voor een ripper shoe met de afmetingen B (breedte) en L (lengte) kan de wrijvingskracht geleverd door de ripper shoe worden berekend:

$$F_{w,rip} = \tau_{rip} \cdot L_{\text{rippershoe}} \cdot B_{\text{rippershoe}} \cdot 2$$

De factor 2 brengt in rekening dat zowel over de boven- als de onderzijde sprake is van wrijving.

A.3.1.2. Snijden van grond component

De weerstand die de grond op het front van de ripper shoe uitoefent om de grond los te kunnen snijden wordt berekend volgens:

$$F_{cut,rip} = \sigma_{cut,rip} \cdot d \cdot B_{\text{rippershoe}}$$

Met

- $\sigma_{cut,rip}$ Weerstand snijrand (kPa).
- d Dikte snijrand ripper shoe (m).
- $B_{\text{rippershoe}}$ Breedte ripper shoe (m).

$$\sigma_{cut,rip} = K_q \cdot \sigma'_v \cdot (1 - \sin\phi) + c \cdot K_c$$

De horizontale kracht volgt dan uit de vermenigvuldiging van de frontale oppervlakte van de ploeg, dikte (d) maal breedte (B).

Voor de factoren K_q en K_c kunnen de waarden in Tabel A.1 1 en Tabel A.1 2 worden gehanteerd:

Tabel A.1 1 Waarde K_q , voor snijrand ripper shoe.

diepte [m - mv]	Hoek van inwendige wrijving ϕ						
	0°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0,5	0	3,3	5,5	9,1	15,6	28,9	57,5
1	0	3,4	5,7	9,5	16,6	31,7	67,0
1,5	0	3,4	5,7	9,6	16,9	32,8	71,1
2	0	3,4	5,8	9,7	17,1	33,4	73,4
2,5	0	3,4	5,8	9,7	17,2	33,7	74,9
3	0	3,5	5,8	9,7	17,3	34,0	75,9
99	0	3,5	5,9	9,9	17,7	35,3	81,3

Tabel A.1 2 Waarde K_c , voor snijrand ripper shoe.

diepte [m - mv]	Hoek van inwendige wrijving ϕ						
	0°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0,5	8,0	17,0	23,5	34,8	56,8	105,0	221,4
1	8,0	17,3	24,0	35,8	59,0	111,2	243,9
1,5	8,1	17,4	24,2	36,1	59,7	113,4	252,5
2	8,1	17,4	24,2	36,2	60,1	114,6	257,0
2,5	8,1	17,5	24,3	36,3	60,4	115,3	259,8
3	8,1	17,5	24,3	36,4	60,5	115,8	261,7
99	8,1	17,6	24,5	36,7	61,3	118,1	271,4

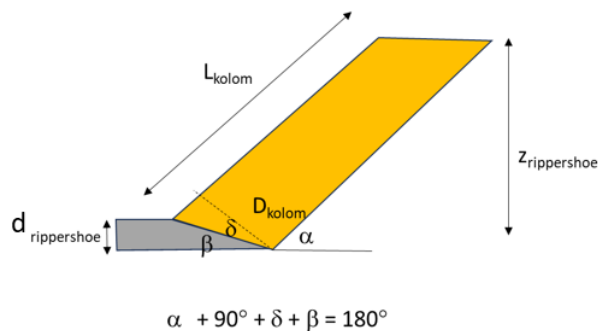
A.3.1.3.

Omhoog drukken grond component

De kracht vanuit het omhoog drukken van de grond component wordt berekend door de wrijving en het gewicht van de grond component te beschouwen. Dit geeft drie componenten die de weerstand bepalen:

- Gewicht grond kolom op de ripper shoe.
- Wrijving langs schuin bezwijkvlak (τ_1).
- Wrijving op de zijvlakken afschuivende kolom (τ_2).

In Figuur A.1 1 is de grondkolom weergegeven.



Figuur A.1 1 Geometrie omhoog gedrukte grondkolom.

Als praktische benadering kan worden aangenomen dat geldt: $\delta = 0$. In dat geval is $\alpha = 90^\circ - \beta$.

Voor deze situaties geldt dan voor D_{kolom} en L_{kolom} :

$$D_{kolom} = d_{ripper\ shoe} / \sin\beta$$

$$L_{kolom} = z_{ripper\ shoe} / \sin\alpha$$

Met:

- $d_{ripper\ shoe}$ Dikte ripper shoe (m).
- β Snijhoek ripper shoe met de horizontaal ($^{\circ}$).

Voor een diepte halverwege de grondkolom ($z = 1/2 z_{rippershoe}$) geldt:

$$\sigma'_{h,0.5} = \sigma'_{v,0.5} \cdot (1 - \sin\phi)$$

De normaalspanning loodrecht op het schuin staande vlak bedraagt dan:

$$\sigma'_n = 0,5 \cdot (\sigma'_v + \sigma'_h) + 0,5 \cdot (\sigma'_v - \sigma'_h) \cdot \cos(2 \cdot \beta)$$

De gemiddelde wrijving bedraagt dan:

$$\tau_1 = c + \sigma'_n \cdot \tan(\phi)$$

Deze werkt per vlak over een oppervlak van $L_{kolom} \cdot B_{rippershoe}$.

Op de zijvlakken is de normaalspanning gelijk aan de horizontale spanning. De gemiddelde wrijving over dat vlak bedraagt:

$$\tau_2 = c + \sigma'_{h,0.5} \cdot \tan(\phi)$$

Deze werkt per vlak over een oppervlak van $L_{kolom} \cdot D_{kolom}$.

Het gewicht van de grondkolom bedraagt:

$$G_{kolom} = \gamma \cdot L_{kolom} \cdot D_{kolom} \cdot B_{rippershoe}$$

Hierbij moet voor de keuze van het volumiek gewicht γ rekening worden gehouden met het gedeelte van de grondkolom die zich onder de grondwaterstand bevindt.

De component evenwijdig aan het bezwijkvlak is:

$$G_{kolom, //} = \gamma \cdot L_{kolom} \cdot D_{kolom} \cdot B_{rippershoe} \cdot \sin\alpha$$

Sommeren van deze weerstanden en rekening houdend met het feit dat alleen de horizontale component van belang is, geeft voor de weerstand van de ripper shoe:

$$F_{gr,rip} = [2 \cdot \tau_1 \cdot L_{kolom} \cdot B + 2 \cdot \tau_2 \cdot L_{kolom} \cdot D_{kolom} + G_{kolom, //}] \cdot \cos\alpha$$

A.3.1.4. Totaal ripper shoe
De totale kracht op de ripper shoe wordt nu:

$$F_{ripper} = (F_{gr,ripper} + F_{w,ripper} + F_{cut,ripper}) \cdot f_{ripper}$$

De waarde van de partiele factor f_{ripper} moet nog worden vastgesteld

A.3.2 Zwaard

De weerstand van het zwaard (F_{zwaard}) bestaat uit een wrijvingscomponent en een component door het snijden van de grond. De gemiddelde weerstand van het zwaard wordt op de halve hoogte van het zwaard berekend (deze is gelijk aan de helft van de afstand tussen maaiveld en bovenkant van de ripper shoe).

A.3.2.1. wrijvingscomponent
De wrijvingscomponent wordt berekend aan de hand van de schuifspanning:

$$\tau_{zwaard} = \sigma'_v (1 - \sin \phi) \cdot \tan \delta + c \cdot f_{ad}$$

Met:

- f_{ad} adhesie factor (-) voor cohesieve gronden boven de A-lijn uit het plasticiteitsdiagram geldt $f_{ad}=0,9$ en voor overige cohesieve gronden geldt $f_{ad}=0,7$.
- δ wandrijvingshoek zwaard ($^{\circ}$) voor granulaire grondsoorten geldt $\delta/\phi = 2/3$, voor cohesieve grondsoorten geldt $\delta/\phi = 1/2$, maar als de cohesieve grondsoorten organisch materiaal bevatten (meer dan 5 %) geldt $\delta/\phi = 1/4$.

Voor een zwaard met de afmetingen L_{zwaard} (lengte in rijrichting) en H_{zwaard} (hoogte, is afstand maaiveld tot bovenkant ripper shoe) kan de wrijvingskracht geleverd door het zwaard worden berekend:

$$F_{w,zwaard} = \tau_{zwaard} \cdot L_{zwaard} \cdot H_{zwaard} \cdot 2$$

A.3.2.2. Snijden van grond component
De weerstand die de grond op het front van het zwaard uitoefent om de grond los te kunnen snijden wordt berekend volgens:

$$F_{cut,zwaard} = \sigma_{cut,zwaard} \cdot d \cdot H_{zwaard}$$

Met

- $\sigma_{cut,zwaard}$ weerstand snijrand (kPa).
- d dikte snijrand zwaard (m).
- H_{zwaard} hoogte zwaard, dit is afstand maaiveld tot bovenkant ripper shoe (m).

$$\sigma_{cut,zwaard} = K_q \cdot \sigma'_v \cdot (1 - \sin \phi) + c \cdot K_c$$

De horizontale kracht volgt dan uit de vermenigvuldiging van de frontale oppervlakte van het zwaard, dikte (d) maal hoogte (H).

De weerstand die de grond op het front van het zwaard uitoefent om de grond los te kunnen snijden wordt berekend aan de hand van de factoren K_q en K_c .

Voor de factoren K_q en K_c kunnen de waarden in Tabel A.1 3 en Tabel A.1 4 worden gehanteerd. Het betreft hier de gemiddelde waarde over de hoogte van het zwaard.:

Tabel A.1 3 Gemiddelde waarde K_q , voor snijrand zwaard.

H _{zwaard} [m]	d [m]	K _q						
		φ=0°	φ=15°	φ=20°	φ=25°	φ=30°	φ=35°	φ=40°
1	0,12	0,0	2,5	4,0	6,1	9,4	14,6	23,2
1,5		0,0	2,7	4,3	6,8	10,6	17,0	27,8
2		0,0	2,8	4,6	7,2	11,5	18,9	31,6
2,5		0,0	2,9	4,7	7,5	12,2	20,3	34,9
3		0,0	3,0	4,9	7,8	12,7	21,6	37,8
1	0,15	0,0	2,4	3,8	5,8	8,8	13,5	21,1
1,5		0,0	2,6	4,1	6,4	9,9	15,7	25,1
2		0,0	2,7	4,4	6,9	10,8	17,4	28,6
2,5		0,0	2,8	4,6	7,2	11,5	18,9	31,6
3		0,0	2,9	4,7	7,5	12,1	20,1	34,3

Tabel A.1 4 Gemiddelde waarde K_c , voor snijrand zwaard.

H _{zwaard} [m]	d [m]	K _c						
		φ=0°	φ=15°	φ=20°	φ=25°	φ=30°	φ=35°	φ=40°
1	0,12	6,2	11,9	15,6	21,2	30,5	46,5	74,4
1,5		6,6	13,0	17,2	23,8	35,2	55,7	93,6
2		6,8	13,6	18,2	25,6	38,4	62,4	108,6
2,5		7,0	14,1	18,9	26,8	40,8	67,6	120,8
3		7,1	14,5	19,5	27,8	42,7	71,7	130,9
1	0,15	6,0	11,3	14,6	19,7	27,9	41,7	65,1
1,5		6,4	12,4	16,3	22,4	32,6	50,5	82,7
2		6,6	13,1	17,4	24,2	35,9	57,2	96,9
2,5		6,8	13,6	18,2	25,6	38,4	62,4	108,6
3		6,9	14,0	18,8	26,6	40,4	66,7	118,6

Voor granulaire gronden kan de wandwrijvingshoek worden bepaald door de helft van de hoek van inwendige wrijving te nemen. Voor cohesieve grondsoorten kan de cohesie c worden vervangen door de ongedraineerde cohesie c_u , de hoek van inwendige wrijving is dan gelijk aan nul.

A.3.2.3. Totaal Zwaard

De totale kracht op het zwaard wordt daarmee:

$$F_{\text{zwaard}} = (F_{w,\text{zwaard}} + F_{\text{cut},\text{zwaard}}) \cdot f_{\text{zwaard}}$$

De partiele factor f_{zwaard} moet nog worden vastgesteld.

A.3.3 Torpedo

De weerstand van de torpedo (F_{torpedo}) bestaat uit een wrijvingscomponent en een component door het verdringen van de grond.

A.3.3.1. Wrijvingscomponent

Belangrijk voor het bepalen van de wandwrijving is de radiale spanning op de torpedo. Door de combinatie van de ripper shoe en torpedo wordt de grond verdrongen. Welk deel hiervan afkomstig is van de torpedo hangt af van de afmetingen van de ripper shoe en van de torpedo. Dit is vergelijkbaar aan de situatie bij het bepalen van de weerstand op de voorkant van de torpedo. In de volgende afleiding wordt uitgegaan van het intrekken van grote diameter leidingen, dus van de situatie dat de torpedo groter is dan de ripper shoe.

Aan de bovenkant van de torpedo wordt grond omhoog gedrukt. De druk op de bovenkant zal dan hoger zijn dan de neutrale gronddruk. Dit effect wordt in rekening gebracht volgens de methode Marston.

De verticale spanning op de bovenkant van de leiding volgt dan uit:

$$\sigma'_{v,top} = \sigma'_{v,n} \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_{\text{torpedo}}} \right)$$

Met:

- $\sigma'_{v,top}$ Effectieve verticale spanning op bovenkant torpedo (kPa).
- $\sigma'_{v,n}$ Neutrale effectieve verticale spanning op niveau bovenkant torpedo (kPa).
- f_m Coëfficiënt voor correctie gronddruk volgens Marston (-).
- H Gronddekking (m).
- D_{torpedo} Buitendiameter torpedo (m).

Voor f_m kan 0,3 worden gebruikt.

Het gewicht van de torpedo wordt deels opgevangen door de bevestiging aan de ploeg. De effectieve spanning op de onderkant van de torpedo wordt daarom gelijk genomen aan die op de bovenkant.

$$\sigma'_{v,onder} = \sigma'_{v,top}$$

Voor de radiale spanning tegen de zijkant wordt de situatie ter hoogte van de hartlijn van de leiding als representatief voor de gemiddelde radiale spanning over de zijkant beschouwd. Dit geeft:

$$\sigma'_{zij} = \sigma'_h = K \cdot \sigma'_{v0}$$

Met:

- σ'_h Radiale spanning tegen zijkant.
- σ'_h Horizontale spanning tegen zijkant.
- σ'_{v0} Effectieve verticale grondspanning ter hoogte hart leiding.
- K Gronddrukcoëfficiënt.

Aan de zijkant van de torpedo wordt grond weggedrukt. Daarom wordt hier uitgegaan van de passieve gronddruk.

Daarmee wordt de uitdrukking voor de horizontale gronddruk:

$$\sigma'_{zij} = \sigma'_{v0} \cdot K_{pas} + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{pas}}$$

Waarbij:

$$\sigma'_{v0} = \sigma'_{v,n} + 0.5 \cdot \gamma' \cdot D_{torpedo}$$

En:

$$K_{pas} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

Met:

- γ' volumiek gewicht van de grond tussen bovenkant en aslijn torpedo in KN/m³, voor grond onder de grondwaterstand moet het effectief gewicht worden genomen en voor grond boven de grondwaterstand het onverzadigde gewicht.

De gemiddelde radiale spanning volgt uit middeling van de verschillende componenten:

$$\sigma'_{rad} = \frac{\sigma'_{v,top} + 2 \cdot \sigma'_{zij} + \sigma'_{v,onder}}{4} = \frac{\sigma'_{v,top} + \sigma'_{zij}}{2}$$

De wrijvingscomponent wordt berekend aan de hand van de schuifspanning:

$$\tau_{tor} = \frac{\sigma'_{v,top} + \sigma'_{zij}}{2} \cdot \tan \delta + c \cdot f_{ad}$$

Met:

- f_{ad} adhesie factor (-) voor cohesieve gronden boven de A-lijn uit het plasticiteitsdiagram geldt $f_{ad}=0,9$ en voor overige cohesieve gronden geldt $f_{ad}=0,7$.
- δ wandrijvingshoek torpedo ($^{\circ}$) voor granulaire grondsoorten geldt $\delta/\phi = 2/3$, voor cohesieve grondsoorten geldt $\delta/\phi = 1/2$, maar als de cohesieve grondsoorten organisch materiaal bevatten (meer dan 5 %) geldt $\delta/\phi = 1/4$.

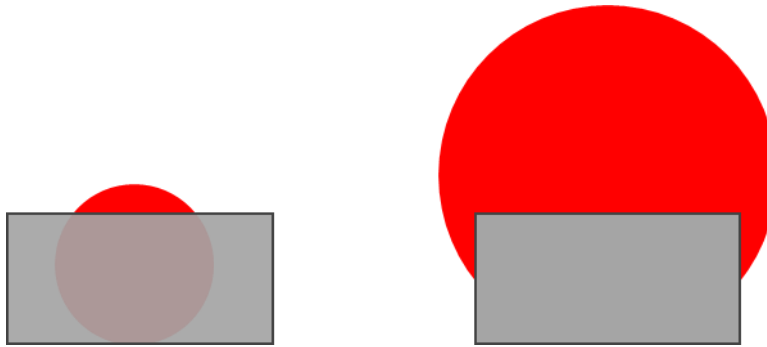
Voor een torpedo met de afmetingen $D_{torpedo}$ (diameter) en $L_{torpedo}$ (lengte kan de wrijvingskracht geleverd door de torpedo worden berekend:

$$F_{w,tor} = \tau_{tor} \cdot L_{torpedo} \cdot \pi \cdot D_{torpedo}$$

A.3.3.2. Weerstand op voorkant torpedo

De bijdrage van de verdringingscomponent is afhankelijk van de afmetingen van de torpedo en van de ripper shoe.

Voor kleine diameter torpedo's ($D_{torpedo} < 2 d_{rippershoe}$) ligt de torpedo geheel in de schaduw van de ripper shoe en kan worden verondersteld dat er de kop van de torpedo geen weerstand geeft. Bij grotere diameters van de torpedo ligt een deel niet in de schaduw van de ripper shoe en is er wel sprake van een bijdrage aan de weerstand. Deze hangt af van het netto oppervlak dat niet in de schaduw van de ripper shoe ligt.



Figuur A.1 2 Illustratie schaduwwerking ripper shoe; links voor een kleine diameter torpedo en rechts voor een grote diameter torpedo

Een eenvoudige benadering die voor alle situaties geldt is niet te geven. Voor een grote diameter torpedo ($D_{\text{torpedo}} > 2 \cdot d_{\text{rippershoe}}$) kan de onderstaande benadering voor het bepalen van het netto oppervlak worden gevolgd.

De straal van de torpedo (R_{torpedo}) en de maximale dikte van de ripper shoe ($d_{\text{rippershoe}}$) zijn van belang. Er wordt vanuit gegaan dat de breedte van de ripper shoe altijd groter of gelijk is aan de diameter van de torpedo. Op basis van dit uitgangspunt is de verdringingsoppervlakte een deel van de torpedo oppervlakte :

$$A_{\text{ver}} = \pi \cdot R_{\text{torpedo}}^2 - \frac{1}{2} \cdot R_{\text{torpedo}}^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha)$$

Met

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \left(\frac{R_{\text{torpedo}} - d_{\text{rippershoe}}}{R_{\text{torpedo}}} \right)$$

De verdringingskracht kan dan worden berekend:

$$F_{\text{ver,tor}} = (\sigma'_v \cdot K_{\text{pas}} + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{\text{pas}}}) \cdot A_{\text{ver}}$$

Met:

$$K_{\text{pas}} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

A.3.3.3. Totaal Torpedo

De totale kracht op de torpedo wordt daarmee:

$$F_{\text{torpedo}} = (F_{\text{w,tor}} + F_{\text{ver,tor}}) \cdot f_{\text{tor}}$$

De partiele factor f_{tor} moet nog worden vastgesteld.

A.3.4 Totale Ploeg kracht

De totale weerstandbiedende kracht van de ploeg is dan gelijk aan:

$$F_{ploeg} = F_{ripper} + F_{zwaard} + F_{torpedo}$$

A.4 Wrijvingskracht langs de leiding

A.4.1 Aanlegfase, tijdens inploegen leiding

Aspecten die een rol zullen spelen bij de schuifweerstand langs de leiding zijn:

- Gronddruk op leiding:
 - ‘Oversnijding’, of eigenlijk wegdrukken grond, bij de torpedo.
 - Terugkomen van de grond achter de torpedo.

Voor de modellering van de grondweerstand wordt uitgegaan van de wrijving langs de leiding. De weerstand is:

$$\tau_{leiding} = c \cdot f_{ad} + \sigma'_{gem} \cdot \tan(\delta)$$

Met:

- $\tau_{leiding}$ Schuifweerstand (kPa).
- c Cohesie (kPa).
- f_{ad} Factor adhesie (-).
- σ'_{gem} Gemiddelde spanning (kPa).
- δ Wandwrijvingshoek ($^{\circ}$).

en

- f_{ad} adhesie factor $f_{ad}=0,5$ voor stalen leidingen zonder coating.
- δ wandwrijvingshoek leiding geldt $\delta/\phi = 1/2$, voor leidingen zonder coating.

Voor het bepalen van de radiale spanning worden de volgende 4 zone's onderscheiden

- Bovenkant leiding.
- Zijkant leiding (links en rechts).
- Onderkant leiding.

De gronddruk op de bovenkant van de leiding wordt volgens de theorie van Terzaghi berekend:

$$\sigma_{n,r} = \frac{B_1 \cdot \left(\gamma' - \frac{c}{B_1}\right)}{K \cdot \tan\phi} \left(1 - e^{-\frac{K \cdot \tan\phi \cdot h}{B_1}}\right)$$

Met:

$$B_1 = \left[D_0 \cdot \left(\frac{1}{2} + \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$$

Met:

- $\sigma_{n,r}$ Gereduceerde neutrale druk [kN/m²].
- K_0 Gronddruk coëfficiënt [-].
- ϕ Hoek van inwendige wrijving [°].
- c Cohesie [kN/m²].
- γ' Volume gewicht [kN/m³].
- h Afstand tussen maaiveld en bovenkant leiding [m].

Indien de leiding onder het grondwater ligt en het effectief gewicht van de leiding minder is dan water (dus de situatie dat de leiding wil opdrijven) is de ondergrens voor de druk de kracht die nodig is om opdrijven te voorkomen. Deze druk volgt dan uit:

$$\sigma_{opw} = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \gamma_w - G_{leiding}}{D}$$

Met:

- $G_{leiding}$ Het gewicht van de leiding per strekkende meter tijdens intrekken [kN/m].
- D Buitendiameter van de leiding.
- γ_w Volumiek gewicht grondwater [kN/m³].

De maximum waarde van σ_{opw} en $\sigma'_{n,r}$ is aan de bovenzijde van de leiding als σ'_{top} van toepassing. Aan de onderkant van de leiding volgt uit de gronddruk op de bovenkant van de leiding en het (effectief) gewicht van de leiding.

$$\sigma'_{ond} = \sigma'_{top} + G'/D$$

Met:

- σ_{ond} Radiale spanning tegen onderkant leiding (kPa).
- σ_{top} Radiale spanning tegen bovenkant leiding (kPa).
- G' Effectief gewicht leiding, $G' = G - 0,25 \cdot \pi \cdot D^2$ [kN/m].

Uiteraard kan deze spanning niet kleiner zijn dan nul.

De gronddruk tegen de zijkant van de leiding wordt als volgt berekend:

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right)$$

De gemiddelde spanning op de leiding volgt dan uit:

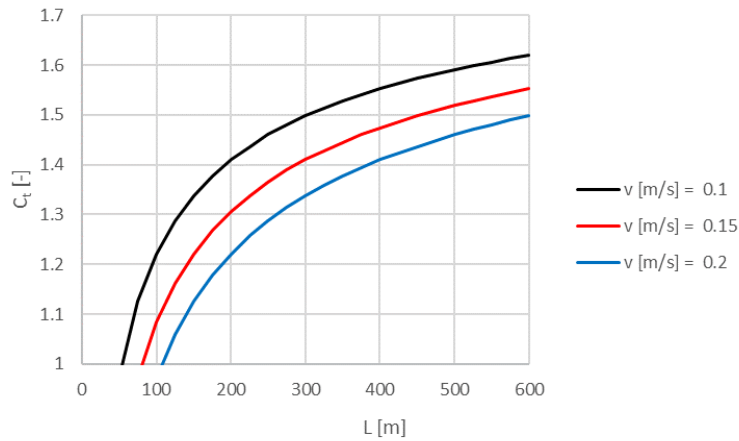
$$\sigma'_{gem} = (2 \cdot \sigma'_h + \sigma'_{ond} + \sigma'_{top}) / 4$$

De wrijvingskracht langs de leiding met een lengte (L) en een diameter (D) volgt dan uit:

$$F_{leiding} = \tau_{leiding} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot C_t \cdot f_w \cdot$$

De waarde voor f_w moet nog worden vastgesteld.

De tijdsfactor C_t brengt de toename van de wrijving in de tijd door kruip van de grond in rekening. Voor de installatiefase kan worden de waarde van C_t worden afgelezen uit de onderstaande figuur.



Figuur A.13 Tijdsfactor als functie van leidinglengte en intreksnelheid.

Als rekening gehouden moet worden met een periode van stilstand tijdens het intrekken (van meer dan 1 uur) moet voor het weer lostrekken van de leiding voor C_t worden gekozen: $C_t = 1,8$. Voor een stilstand periode korter dan een uur geldt $C_t = 1,5$.

A.4.2 Gebruiksfase na aanleg door Ploegen

Voor de berekeningen van de wrijving langs de leiding in de gebruiksfase wordt ook bovenstaand model gebruikt. Daarbij worden de volgende aanpassingen doorgevoerd: De gronddruk op de leiding is de neutrale gronddruk:

$$\sigma_{v,n} = \sigma'_v + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{8}\pi\right) \cdot D_0 \cdot \gamma'$$

Met:

- σ'_v Verticale effectieve spanning op niveau bovenkant buis [kN/m²].
- D_0 Diameter van de leiding [m].
- γ' Effectief volume gewicht [kN/m³].

Voor de gronddruk tegen de zijkant van de leiding wordt de neutrale gronddruk gebruikt ($K_0 = 1 - \sin\phi$)

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot (1 - \sin\phi)$$

Er wordt geen C_t tijdsfactor in rekening gebracht, het lange termijn tijdseffect is aanwezig in de gegeven aanpassingen.

De wrijvingskracht langs de leiding die met een lengte (L) en een diameter (D), ongeveer 100 dagen na aanleg, volgt dan uit:

$$F_{leiding} = \frac{\tau_{leiding} \cdot L \cdot \pi \cdot D}{f_w}$$

De waarde van de partiele factor f_w zal nog moeten worden vastgesteld.

B Bepaling modelfactor voor weerstand ploeg, onderdeel omhoogdrukken grond

B.1 Doelstelling

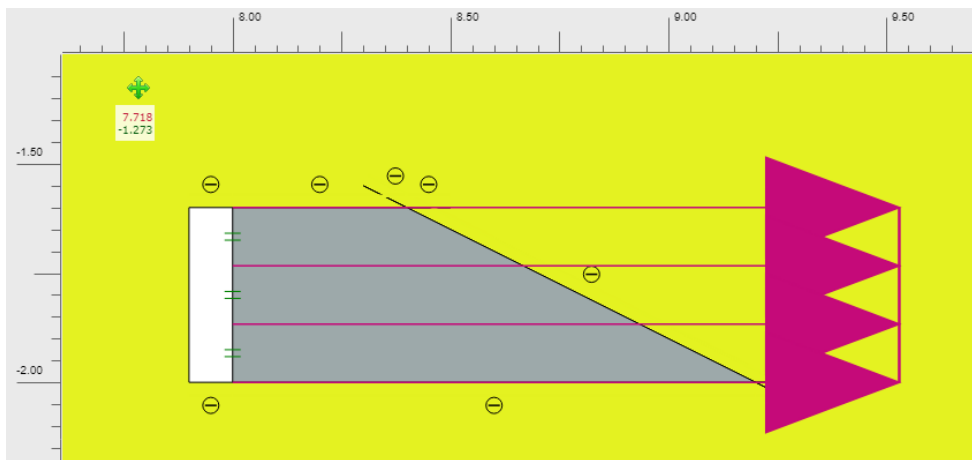
In paragraaf 6.2.4 is een uitdrukking afgeleid voor de weerstand door het omhoogdrukken van de grond bij de ripper shoe. Verwacht wordt door de daarbij gebruikte benaderingen deze component wordt overschat. In deze bijlage wordt voor deze component een vergelijking gemaakt met de weerstand volgens EEM berekeningen met PLAXIS, versie 2023.2.0.2059. Op basis daarvan wordt een modelfactor gedefinieerd.

B.2 Modelling in PLAXIS

De vergelijkende berekeningen zijn uitgevoerd met PLAXIS 2D. Voor de berekeningen zijn de volgende keuzes gemaakt:

- Homogene grond.
- Grondwaterstand onder onderkant ripper shoe.
- Achter de ripper shoe is een open ruimte aanwezig, zoals die in werkelijkheid ook wordt verwacht.
- De ripper shoe is gemodelleerd als een star lichaam met een lengte van 1,2m, een dikte van 0,4m en een snijhoek van 1(V):3(H).
- De ripper shoe wordt verticaal vastgehouden, de belasting is een voorgeschreven horizontale verplaatsing.

Figuur B.1 1 toont de gebruikte geometrie.



Figuur B.1 1 Geometrie ripper shoe in PLAXIS.

Als grondmodel is het Mohr-Coulomb model gebruikt. In de berekeningen is gevarieerd met de stijfheid en de sterkte van de grond. Voor de interface tussen de ripper shoe en de omliggende grond is $R_{inter} = 0,5$ gebruikt.

In de open ruimte achter de ripper shoe is een kleine wateroverspanning voorgeschreven. Het doel daarvan is het voorkomen van instabiliteit van de linkerrand van de open ruimte, waardoor er geen goede berekening meer gemaakt kan worden.

B.3 Resultaten PLAXIS berekening

De belangrijkste resultaten van de berekening zijn samengevat in Tabel B.1 1.

Tabel B.1 1 Resultaten berekening weerstand ripper shoe met PLAXIS,, $R_{inter} = 0,5$.

E [kN/m ²]	ϕ [°]	c [kPa]	Waterspanning in open ruimte [kPa]	F _x [kN/m]
10 000	30	0,1	3	60
1000	30	0,1	3	60
1000	22,5	0,1	8	46
1000	0	15	0	49

De stijfheid van de grond blijkt nagenoeg geen invloed te hebben op de weerstand.

B.4 Resultaten analytisch model

Ter vergelijking is de weerstand ook berekend met het opgestelde model. In de PLAXIS berekening is er geen weerstand tegen de zijkant (component τ_2) in het opgestelde model. Daarom wordt deze component niet meegenomen.

De resultaten van de berekening zijn weergegeven in Tabel B.1 2.

Tabel B.1 2 Weerstand door opdrukken grond, analytisch model, $\delta/\phi = 0,5$, adhesie is $0,5 \cdot \text{cohesie}$.

component	Component	Situatie $\phi = 30^\circ$	Situatie $\phi = 22,5^\circ$	C = 15 kPa
Wrijving boven- en onderzijde	$\sigma'v$ [kPa]	28,9	28,9	28,9
	τ [kPa]	7,74	5,75	7,5
Totaal wrijving onder- en bovenkant [kN/m]		18,6	13,8	18
Snijrand		3,4	1,7	1,4
Opdrukken grond	Dkolom [m]	1,265	1,265	1,265
	Lkolom [m]	2,214	2,214	2,214
	σ' normal [kPa]	33,0	33,2	33,9
	τ_1 [kPa]	19,1	13,8	15
	τ_2 [kPa] ¹⁾	0	0	0
	Fwrijving,hor [kN/m]	26,7	19,3	21,0
	G [kN]	47,6	47,6	47,6
Weerstand, totaal [kN/m]	Fgrond [kN/m]	14,3	14,3	14,3
		164,5		54,7

¹⁾ Deze is op nul gesteld, gezien het doel van deze berekeningen

Uit de voorgaande resultaten laat zich een modelfactor (γ_{model}) afleiden volgens:

$$F_{PLAXIS} = F_{w,rip} + F_{cut,rip} + \gamma_{model} \cdot F_{gr,rip}$$

Tabel B.1 3 Bepaling modelfactor.

		Situatie $\phi = 30^\circ$	Situatie $\phi = 22,5^\circ$	c = 15 kPa
Resultaat PLAXIS		60	46	49
Resultaat analytisch				
	Wrijving + snijrand	22,0	15,5	19,4
	Opdrukken grond	41,0	33,6	35,3
	totaal		46,0	54,76
modelfactor		0,93	0,91	0,84

Op basis van deze resultaten kan voor de modelfactor $\gamma_{\text{model}} = 0,9$ worden gekozen.

C Validatie weerstand leiding

C.1.1 Selectie grondparameters testlocaties

Op basis van de grondbeschrijving, de gemeten conusweerstand (voorzover beschikbaar) de gerapporteerde dichtheid en tabel 2.b van NEN 9997 zijn de relevante grondparameters bepaald of zo goed mogelijk geschat. Nier overal is tot voldoende diepte grondonderzoek beschikbaar, bij Biddinghuizen zijn slechts tot mv – 0,8 m sonderingen beschikbaar.

Dat resulteert in het overzicht in de onderstaande tabel.

Tabel C.1 1 Grondparameters voor de testlocaties.

testlocatie	Grondslag leiding	omschrijving	Qc [MPa]	ϕ [°]	c [kPa]	γ [kN/m ³]	opmerking
Biddinghuizen	klei, zandig, vast	Klei, uiterst siltig, zwak humeus,	2,5	30	1	16.8	gamma uit grondonderzoek; qc van penetrologger
	zand, onverzadigd	Zand, matig fijn, matig siltig (geen beschrijving van vastheid/dichtheid)	3	35	5	17 / 20	geen qc, geschatte waarden op basis CPT omgeving
	zand, verzadigd		3	35	0	17 / 20	ditto
Sliedrecht	veen, vast	veen, slap of zeer slap	0,4 MPa (penetro logger) of 0,15 Mpa (CPT Koops)	15	2,5	12 / 10	gamma uit grondonderzoek

C.1.2 Verificatie en validatie model

Met de vastgestelde grondeigenschappen worden de testen in Biddinghuizen en Sliedrecht nagerekend. De gevonden weerstanden volgens het theoretisch model worden vergeleken met de gevonden weerstanden tijdens deze testen.

C.1.2.1. Biddinghuizen, klei onverzadigd

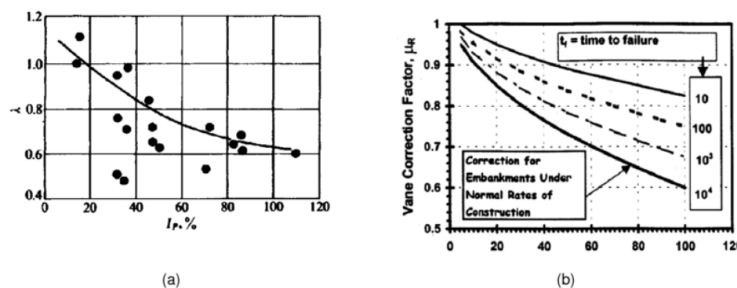
Tabel C.1 2 Berekening weerstand, leiding in onverzadigde klei, situatie test Biddinghuizen.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,323	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	0,62	
gronddekking	[m]	0,9	
GWS	[m - mv]	1,6	
ϕ	[°]	30	
c	[kPa]	1	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,5	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	4,52	15,12
σ'_{zij}	[kPa]	5,35	8,92
σ'_{onder}	[kPa]	6,44	17,04
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	5,42	12,50
weerstand tgv σ'	[kPa]	1,45	3,35
weerstand tgv adhesie	[kPa]	0,50	0,50
τ_{totaal}	[kPa]	1,95	3,85
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			1,97

De berekende weerstand voor de aanlegfase is $\tau = 2,0$ kPa. Gemeten is $\tau = 5,9/11,6$ kPa. Er is dus sprake van een forse onderschatting weerstand. En dat is onverwacht want in onverzadigde zandige klei zou juist de aanwezigheid van een spleet naast de leiding worden verwacht.

Voor een betere overeenstemming zou bijvoorbeeld met $c = 10$ kPa i.p.v. $c = 1$ kPa gerekend moeten worden.

Volgens de torvane proeven is er sprake van een hoge ongedraineerde schuifsterkte (50 à 100 kPa). Hierop is mogelijk nog een correctie nodig volgens de onderstaande figuur



38. (a) Reduction factor of undrained shear strength obtained from vane shear tests for embankment stability analyses (after Bjerrum, 1972), (b) Reduction factor curves as function of the time to failure and of the plasticity index (after Chandler, 1988).

Figuur C.1 1 Correctie op schuifweerstand volgens torvane test volgens Bjerrum.

Volgens rapport Antea geldt voor de onverzadigde klei een plasticiteitsindex van $I_p = 20,5\%$. Dat zou betekenen dat de reductiefactor ongeveer 1 is en er in dit geval toch geen reductie nodig is.

De onderstaande tabel laat het resultaat zien als die hogere waarde voor de cohesie wordt gebruikt.

Tabel C.1 3 Berekening weerstand, leiding in onverzadigde klei met hoge cohesie, situatie test Biddinghuizen.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,323	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	0,62	
gronddekking	[m]	0,9	
GWS	[m - mv]	1,6	
ϕ	[°]	0	
c	[kPa]	75	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,5	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	0,00	15,12
σ'_{zij}	[kPa]	5,35	8,92
σ'_{onder}	[kPa]	1,92	17,04
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	3,16	12,50
weerstand tgv σ'	[kPa]	0,00	0,00
weerstand tgv adhesie	[kPa]	37,50	37,50
τ_{totaal}	[kPa]	37,50	37,51
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			1,00

De berekende weerstand voor de aanlegfase is nu $\tau = 37,5$ kPa. Gemeten is $\tau = 5,9/11,6$ kPa. Er is dus sprake van een forse overschatting weerstand. Hierbij geldt nog wel dat in het rekenmodel de adhesie niet wordt gecorrigeerd voor het aandeel van het oppervlak waarbij de leiding daadwerkelijk in contact met de grond is. Als veronderstelt wordt dat dit alleen de onderkant is (dus naar schatting een kwart van de omtrek) dan zal voor de gemiddelde weerstand 9,4 kPa worden voorspeld, wat beter past bij de gemeten weerstand.

Een andere aanpassing is om voor de verhouding adhesie/cohesie uit te gaan van 0,3 i.p.v. 0,5. In dat geval wordt de schatting voor de gemiddelde schuifweerstand, als tevens wordt uitgegaan van de aanname dat maar een kwart van het leidingoppervlak effectief in contact is met de klei: $0,3 \cdot 75/4 = 5,6$ kPa. Bij de proefsleuven tijdens de test in Biddinghuizen is geconstateerd dat de grond aansluit op de leiding. Er is dus geen spleet tussen leiding en grond geconstateerd. Wat de contactdruk tussen grond en leiding was is uiteraard uit de visuele observaties niet vast te stellen.

C.1.2.2. Biddinghuizen, onverzadigd zand

De onderstaande tabel geeft de berekening van de weerstand in onverzadigd zand. Daarbij is rekening gehouden met de een schijnbare cohesie door capillaire spanning. Hiervoor is geschat $c = 5$ kPa.

Tabel C.1 4 Berekening weerstand, leiding in onverzadigd zand, situatie test Biddinghuizen.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,323	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	0,62	
gronddekking	[m]	1,4	
GWS	[m - mv]	1,6	
ϕ	[°]	35	
c	[kPa]	5	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,5	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	0,00	23,52
σ'_{zij}	[kPa]	7,87	13,12
σ'_{onder}	[kPa]	1,92	25,44
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	4,42	18,80
weerstand tgv σ'	[kPa]	1,39	5,93
weerstand tgv adhesie	[kPa]	2,50	2,50
τ_{totaal}	[kPa]	3,89	8,43
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			2,17

De berekende weerstand voor de aanlegfase is $\tau = 3,9$ kPa. Gemeten is $\tau = 3,5/5,2$ kPa. Er is dus sprake van een redelijke overeenstemming tussen de gemeten weerstand en de postdictie.

C.1.2.3. Biddinghuizen, verzadigd zand

Tabel C.1 5 geeft de berekening voor de situatie van een leiding in verzadigd zand.

Tabel C.1 5 Berekening weerstand, leiding in verzadigd zand, situatie test Biddinghuizen.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,323	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	-0,20	
gronddekking	[m]	2,1	
GWS	[m - mv]	1,6	
ϕ	[°]	35	
c	[kPa]	0	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,5	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	9,39	32,20
σ'_{zij}	[kPa]	12,13	16,91
σ'_{onder}	[kPa]	8,78	31,59
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	10,61	24,40
weerstand tgv σ'	[kPa]	3,34	7,69
weerstand tgv adhesie	[kPa]	0,00	0,00
τ_{totaal}	[kPa]	3,34	7,69
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			2,30

De berekende weerstand voor de aanlegfase is $\tau = 3,3$ kPa. Gemeten is $\tau = 3,3/3,8$ kPa. Hier is dus een redelijke overeenstemming tussen de gemeten weerstand en de postdictie.

Tabel C.1 6 tot Tabel C.1 9 geeft de berekening van de weerstand voor een leiding in veen. De sterkte parameters voor veen zijn bepaald parameters volgens NEN 9997, tabel 2.b voor veen, matig, en daarbij lage schatting voor c' .

NB door Antea is in de toplaag (mv – 0,1 m, dus onverzadigd en mogelijk nog met graswortels) met de torvane een weerstand van 35 a 100 kPa gemeten. Deze waarde zal niet representatief zijn voor de schuifsterkte op niveau van de leiding. Daarom wordt hier niet mee gerekend.

C.1.2.4. Sliedrecht, veen

Tabel C.1 6 en verder geeft de berekening voor de situatie van een leiding in veen.

Tabel C.1 6 Berekening weerstand, leiding in veen, situatie test Sliedrecht met 12" leiding.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,323	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	-0,20	
gronddekking	[m]	1,7	
GWS	[m - mv]	0,25	
ϕ	[°]	15	
c	[kPa]	2,5	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,5	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	0,61	3,00
σ'_{zij}	[kPa]	0,90	1,50
σ'_{onder}	[kPa]	0,00	2,39
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	0,60	2,10
weerstand tgv σ'	[kPa]	0,08	0,28
weerstand tgv adhesie	[kPa]	1,25	1,25
τ_{totaal}	[kPa]	1,33	1,53
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			1,15

De berekende weerstand voor de aanlegfase is $\tau = 1,3$ kPa. Gemeten is $\tau = 1,0$ kPa. Hier is dus een redelijke overeenstemming tussen de gemeten weerstand en de postdictie. De weerstand wordt hier voornamelijk bepaald door de adhesie/cohesie.

Als variant is voor de aanlegfase gerekend wordt met verhouding adhesie/cohesie = 0,3. Tabel C.1 7 geeft hiervoor de berekening.

Tabel C.1 7 Berekening weerstand, leiding in veen, situatie test Sliedrecht met 12" leiding.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,323	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	-0,20	
gronddekking	[m]	1,7	
GWS	[m - mv]	0,25	
ϕ	[°]	15	
c	[kPa]	2,5	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,3	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	0,61	3,00
σ'_{zij}	[kPa]	0,90	1,50
σ'_{onder}	[kPa]	0,00	2,39
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	0,60	2,10
weerstand tgv σ'	[kPa]	0,08	0,28
weerstand tgv adhesie	[kPa]	0,75	1,25
τ_{totaal}	[kPa]	0,83	1,53
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			1,84

Nu is er dus sprake van enige onderschatting van de weerstand tijdens aanleg.

Tabel C.1 8 Berekening weerstand, leiding in veen, situatie test Sliedrecht met 24" leiding.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,61	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	-1,44	
gronddekking	[m]	1,75	
GWS	[m - mv]	0,25	
ϕ	[°]	15	
c	[kPa]	2,5	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,3	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	2,37	3,00
σ'_{zij}	[kPa]	0,90	1,50
σ'_{onder}	[kPa]	0,00	0,63
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	1,04	1,66
weerstand tgv σ'	[kPa]	0,14	0,22
weerstand tgv adhesie	[kPa]	0,75	1,25
τ_{totaal}	[kPa]	0,89	1,47
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			1,66

De berekende weerstand voor de aanlegfase is $\tau = 0,9$ kPa. Gemeten is $\tau = 1,0$ kPa. Hier is dus een redelijke overeenstemming tussen de gemeten weerstand en de postdictie. De weerstand wordt hier voornamelijk bepaald door de adhesie/cohesie.

Tabel C.1 9 Berekening weerstand, leiding in veen, situatie test Sliedrecht met 28" leiding.

parameter	eenheid	aanlegfase	bedrijfsfase
Diameter leiding	[m]	0,711	
Effectief gewicht leiding, G'	[kN/m]	-2,24	
gronddekking	[m]	1,5	
GWS	[m - mv]	0,25	
ϕ	[°]	15	
c	[kPa]	2,5	
Verhouding wrijving wand/grond, δ/ϕ	[-]	0,5	0,5
Verhouding adhesie/cohesie	[-]	0,3	0,5
K_{hor}	[-]	0,3	0,5
σ'_{top}	[kPa]	3,15	3,00
σ'_{zij}	[kPa]	0,90	1,50
σ'_{onder}	[kPa]	0,00	-0,15
$\sigma'_{gemiddeld}$	[kPa]	1,24	1,46
weerstand tgv σ'	[kPa]	0,16	0,19
weerstand tgv adhesie	[kPa]	0,75	1,25
τ_{totaal}	[kPa]	0,91	1,44
$\tau_{bedrijf}/\tau_{aanleg}$			1,58

De berekende weerstand voor de aanlegfase is $\tau = 0,75$ kPa. Gemeten is $\tau = 1,0$ kPa. Hier is dus een redelijke overeenstemming tussen de gemeten weerstand en de postdictie. De weerstand wordt hier voornamelijk bepaald door de verhouding adhesie/cohesie.

C.1.3 Overzicht resultaten

De berekende weerstand tijdens de aanlegfase en de gebruiksfase is samengevat in de onderstaande tabel.

Tabel C.1 10 Samenvatting resultaten berekening.

locatie	grondslag	Weerstand, bij meting [kPa]		Weerstand, volgens berekening [kPa]			verhouding weerstand lange duur / korte duur [-]		verhouding weerstand meting/berekening, korte duur
		aanleg	herstart	adh/.coh bij aanleg	aanleg	lange duur	meting	berekening	
Biddinghuizen	klei, onverzadigd	5,9	11,57	0,5	1,95	3,85	1,96	1,97	3,03
	zand, onverzadigd	3,49	6,24	0,5	3,89	8,43	1,79	2,17	0,90
	zand, verzadigd	3,28	3,82	0,5	3,34	7,69	1,16	2,30	0,98
Sliedrecht	Veen, D = 12"	1,09	0,87	0,5	1,33	1,53	0,80	1,15	0,82
	Veen, D = 12"	1,09	0,87	0,3	0,83	1,53	0,80	1,84	1,31
	Veen, D = 24"	0,78	1,44	0,3	0,89	1,47	1,85	1,65	0,88
	Veen, D = 28"	0,8	1,51	0,3	0,91	1,44	1,89	1,58	0,88
Gemiddelde, Biddinghuizen							1,64	2,15	
Gemiddelde, Sliedrecht		0,89	1,27		0,88	1,48	1,51 / 1,43	1,69	

Voor zand, verzadigd, en veen, verzadigd, is er een acceptabele tot goede overeenstemming tussen de berekende en de gemeten weerstand tijdens de aanlegfase.

Voor zand, onverzadigd is er sprake van een goede overeenstemming, met mogelijk enige onderschatting van de weerstand. Mogelijk zijn de grondparameters niet goed bepaald.

Voor klei onverzadigd is er een slechte overeenstemming tussen de weerstand volgens de modellering en de gemeten waarde.

D Narekenen situatie inploegen leiding bij Aalsmeer

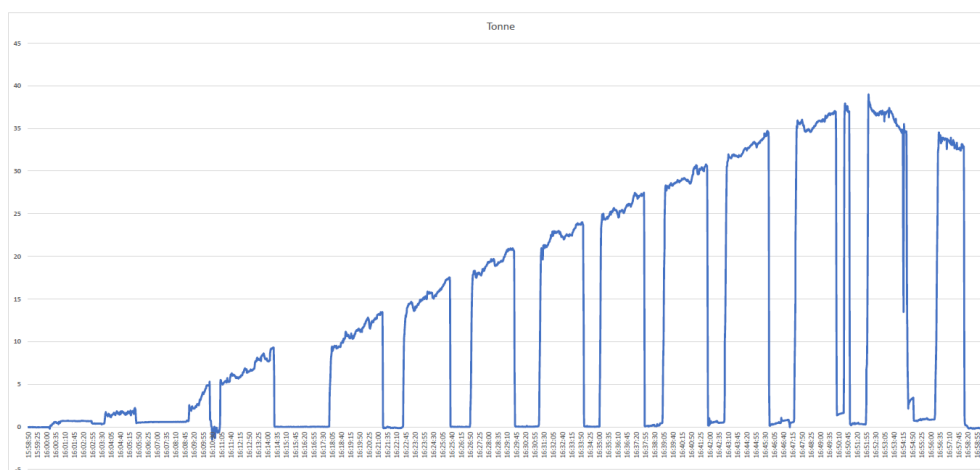
D.1 Situatie

Bij Aalsmeer is een 12" leiding geïnstalleerd middels inploegen. Figuur D.1 1 toont de gebruikte ploeg. Bij deze installatiemethode is geen torpedo gebruikt.



Figuur D.1 1 Ploeg zonder torpedo (foto: Deltares).

De leiding is in gedeelten van ongeveer 350 tot 400 m ingetrokken. Bij het intrekken is de kracht aan het begin van de leiding gemeten. Figuur D.1 2 toont een registratie.



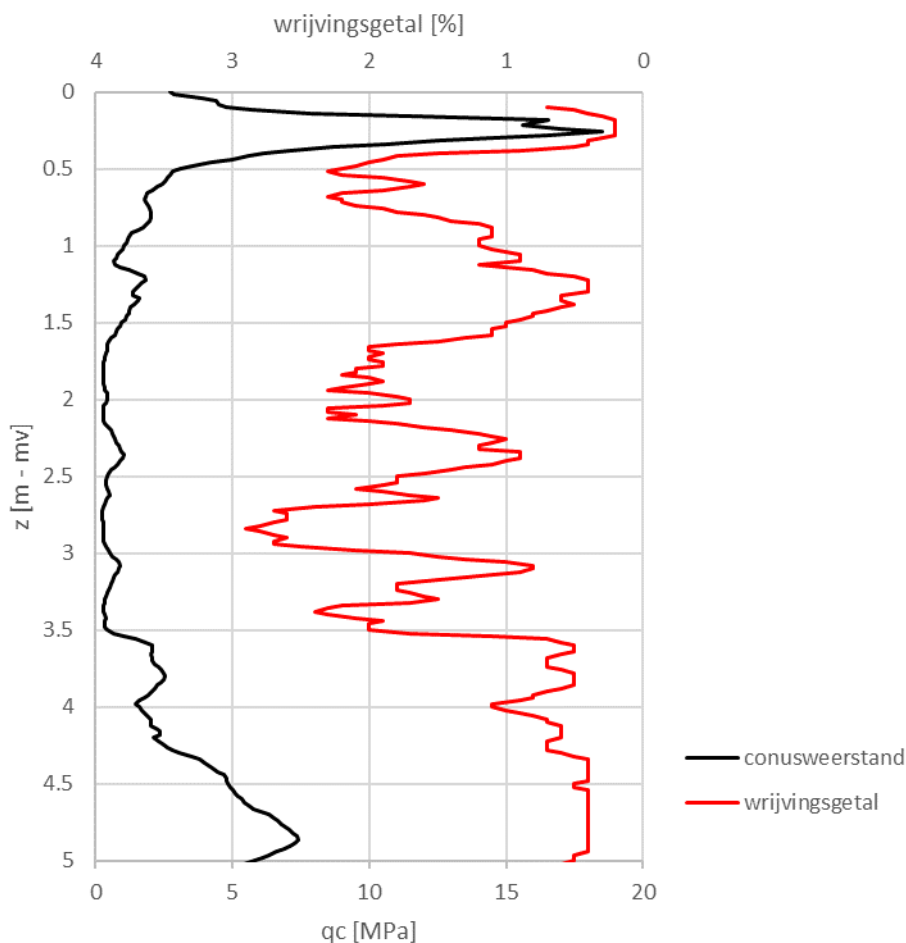
Figuur D.1 2 Gemeten trekkracht kop leiding, lengte leiding 355 m.

De totale tijdsduur voor het intrekken van dit gedeelte was 1 uur.

De gronddekking op de leiding was 1,8 m.

D.2 Geselecteerd grondprofiel voor de analyses

Figuur D.1 3 toont de gemeten conusweerstand over de eerste 5 m onder maaiveld van een sondering in de omgeving.



Figuur D.1 3 Sondering.

Op basis van deze sondering is een grondprofiel opgesteld, dit grondprofiel is weergegeven in Tabel D.1 1. Voor de grondparameters zijn best-estimate waarden gebruikt, omdat het hier gaat om het narekenen van een meting en niet om een ontwerpsituatie. Deze waarden zijn iets hoger dan de laag karakteristieke waarden in tabel 2.b van NEN-9997. Voor het zand boven de grondwaterstand is daarbij rekening gehouden met de schijnbare cohesie in vochtig zand.

Tabel D.1 1 Geselecteerd grondprofiel.

laag	Bovenkant [m – mv]	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	c' [kPa]
toplaag zand	0	17 / 20	35	2,5
zand, kleihoudend	0,5	17 / 20	27,5	2,5
klei, zwak zandig	1,5	15 / 15	22,5	2,5

De grondwaterstand is gelegen op mv – 1 m.

D.3 Wrijvingsweerstand leiding

Uit de gerapporteerde trekkracht laat zich een gemiddelde wrijvingsweerstand terugrekenen. De volgende getallen worden gebruikt:

- Lengte leidinggedeelte: 355 m.
- Diameter: 0,323 m.
- Gemeten kracht op leiding: 370 kN.

Dit geeft een gemiddelde weerstand van 1,0 kPa op het leidingoppervlak. Deze waarde komt goed overeen met de weerstand die bij de testen in Sliedrecht in veen is gevonden.

De volgende figuur geeft de gebruikte invoergegevens voor de berekening.

gegevens leiding						
L		355	[m]			
D_0 = D_leiding		0.323	[m]			
D_binnenbuis		0.323	[m]			
t_staal		6.3	[mm]			
annulus		0	[m]			
gamma_water		9.81	[kN/m ³]			
delta/phi		0.5	[-]			
adhesie/cohesie		0.5	[-]			
gronddekking		1.8	m			
G_leiding, leeg		0.47	[kN/m]			

gegevens grond						
maaiveld		0	[m + NAP]			
GWS		-1	[m + NAP]			
laagopbouw						
	niveau	bk	gamma	sigma_v	waterspanning	sigma'_v phi
	maaiveld	0	17		0	30
		-1	17		17	22.5
	bk leiding	-1.8	15	30.6	17.66	12.942 22.5
	hart leiding	-1.9615	15	33.02	9.43	23.5902
			gamma_gem	18.35	gamma''_gem	7.19
					phi_gem	26.67

parameters laag waarin leiding ligt	
phi	22.5 [graden]
c	2.5 [kPa]

Figuur D.1 4 Overzicht invoergegevens voor berekening weerstand leiding.

Hiermee is de berekening te maken. De volgende figuur geeft het resultaat van de berekening, inclusief alle tussenstappen.

berekening wrijvingsweerstand			
F_opw	0.80 [kN/m]	opwaartse waterdruk op leiding	
G'	-0.33 [kN/m]	effectief gewicht leiding	
gronddruk op leiding			
gronddruk bovenkant en onderkant leiding			
breedte boorgang	0.323 [m]		
phi	26.66667 [graden]	overgenomen uit tabel 'gegevens grond'	
c	2.5 [kPa]	voor berekening B1, conservatief op nul gesteld	
gamma'_avg	7.19 [kN/m ³]	overgenomen uit tabel 'gegevens grond'	
B1	0.36 [m]		
K	0.45 [-]	horizontale gronddrukcoëfficiënt hart leiding	
sigma'_n, boven, grond	0.28 [kPa]	druk tgv zakkende grond	
sigma'_boven, opdrijven	1.03 [kPa]	druk tgv opdrijven	
sigma_n,boven	1.03 [kPa]	maatgevend is grootste waarde van gronddruk of druk tgv opdrijven	
sigma"_onder	0.00 [kPa]		
gronddruk zijkant leiding			
sigma'_v,zij	23.59 [kPa]		
sigma'_zij	10.53 [kPa]		
gemiddelde radiale spanning			
sigma'_gem	5.52 [kPa]		
weerstand, exclusief factoren			
tau_gem	2.35 [kPa]		
T	2.38 [kN/m]		
T_leiding, excl. factoren	846.14 [kN]		
weerstand, inclusief factoren			
tijdsfactor	1 [-]	aflezen uit figuur	
tau,gem, incl tijdsfactor	2.35 [kPa]		
partiele factor	1 [-]		
tau_reken	2.35 [kPa]		
T_intrekken, reken	846 [kN]		
staalspanning			
A_staal	0.006393 [m ²]		
sigma_staal	132358 [kPa]		
	132.36 [MPa]		

Figuur D.15 Berekening wrijvingsweerstand leiding.

De berekende wrijvingsweerstand is, bij gebruik van een tijdsfactor $C_t = 1,0$ en een partiële factor van 1,0, 2,35 kPa. Dit is meer dan de gemeten weerstand. Ongeveer de helft van de berekende weerstand is afkomstig van de adhesie tussen leidingen grond. Dit is momenteel nog een onzekere factor. Indien hiervoor een lagere waarde gebruikt mag worden dan de nu gebruikte verhouding tussen adhesie en cohesie van 0,5 zal de berekende wrijvingsweerstand navenant lager worden. Het resultaat van de predictie ligt dan dicht bij de gemeten waarde.

D.4 Weerstand ploeg

De weerstand van de ploeg wordt in dit geval geleverd door de ripper shoe en het zwaard.

De volgende afmetingen van de ploeg zijn gebruikt:

- Ripper shoe
 - $B_{ripper} = 0,9$ [m], breedte loodrecht op trekrichting.
 - $d_{ripper,snijrand} = 0.01$ [m], dikte snijrand.
 - $\beta = 18.4$ [°], hoek snijrand met horizontaal.
 - $L_{ripper} = 1.2$ [m], lengte in trekrichting.
 - $D_{ripper} = 0.4$ [m], dikte ripper shoe.
 - $\delta/\phi = 0.5$
 - adhesie/cohesie = 0.5
- Zwaard
 - $d_{zwaard} = 0.12$ [m].
 - $L_{zwaard} = 0.9$ [m].
 - $H_{zwaard} = 1.723$ [m] afstand tussen maaiveld en bovenkant ripper shoe.

Bij dit project is geen torpedo gebruikt, zodat de weerstand daarvan niet meegenomen hoeft te worden. De dikte van de ripper shoe is wel groter dan de diameter van de leiding zodat deze ten opzichte van de leiding een oversnijding geeft.

D.4.1 Weerstand ripper shoe

Voor de verschillende componenten van de weerstand worden de volgende waarden gevonden.

** wrijving

- Verticale korrelspanning op bovenkant ripper shoe ($m_v - 1,723$ m):
 - $\sigma'_v = 23,1$ kPa.
- Dit geeft een wrijvingsweerstand van:
 - $\tau = 5,85$ kPa
- Sommatie over boven- en onderkant geeft vervolgens:
 - $F_{fric,ripper} = 12,6$ [kN]

** snijrand

- Effectieve verticale spanning op niveau snijrand:
 - $\sigma'_{v,tip} = 25,1$ [kPa]
- Voor de factoren K_q en K_c wordt gevonden:
 - $K_q = 7,72$
 - $K_c = 32,2$
- Dit geeft voor de kracht op de snijrand:
 - $F_{cut,rip} = 1,8$ [kN]

** opdrukken grondkolom

- $D_{kolom} = 1.265$ [m].
- $L_{kolom} = 2.238$ [m].
- $\sigma'_{h,gem} = 7,75$ [kPa].
- $\sigma_{normal} = 23,39$ [kPa].
- $\tau_1 = 12,18$ [kPa].
- $\tau_2 = 5,71$ [kPa].
- $G'_{kolom} = 30,14$ [kN].
- $G'_{kolom //} = 28,59$ [kN].
- Dit geeft:

- $F_{\text{grond,ripper,wrijving}} = 25,74$ [kN].
- $F_{\text{grond,ripper,masse}} = 9,04$ [kN].

D.4.2 Weerstand zwaard

Voor de verschillende componenten van de weerstand worden de volgende waarden gevonden.

** wrijving

- Effectieve verticale spanning op onderzijde zwaard (= bovenkant ripper shoe):
 - $\sigma'_v = 23,12$ [kPa].
- Hieruit volgt voor de gemiddelde wrijving langs de zijkant zwaard:
 - $\tau_{\text{zwaard,gem}} = 8,38$ [kPa].
- Integratie over het oppervlak (2 zijden) geeft:
 - $F_{\text{fric,zwaard}} = 26,0$ [kN].

** snijden grond

- Gemiddelde effectieve verticale spanning over hoogte zwaard
 - $\sigma''_v, \text{avg} = 11,56$ [kPa].
- Voor de factoren K_q en K_c wordt gevonden:
 - $K_q = 5,73$.
 - $K_c = 25,31$.

Hieruit volgt voor de spanning op de snijrand:

- $\sigma_{\text{snijrand,zwaard}} = 104,11$ [kPa].
- De totale weerstand van de snijrand wordt dan:
 - $F_{\text{snijrand,zwaard}} = 21,54$ [kN]

D.4.3 Weerstand torpedo

In dit geval is er geen torpedo aanwezig, zodat de weerstand van de torpedo 0 kN is.

D.4.4 Sommatie krachten

In Tabel D.1 2 worden de resultanten van de berekeningen in de voorgaande paragrafen samengevat.

Tabel D.1 2 Samenvatting resultaat berekening weerstand ploeg.

Hoofdonderdeel ploeg	Component voor weerstand	kracht [kN]
ripper shoe		
	wrijving	12,6
	snijrand	1,8
zwaard	opdrukken	31,3
	wrijving	26,0
	snijden	21,5
torpedo		
	wrijving	0,0
	weerstand op voorkant	0,0
TOTAAL		93,3

De weerstand van de ploeg is in dit geval dus 94 kN. Hierbij is voor de weerstand door het opdrukken van de grond een modelfactor van 0,9 toegepast.

D.5 Weerstand lier

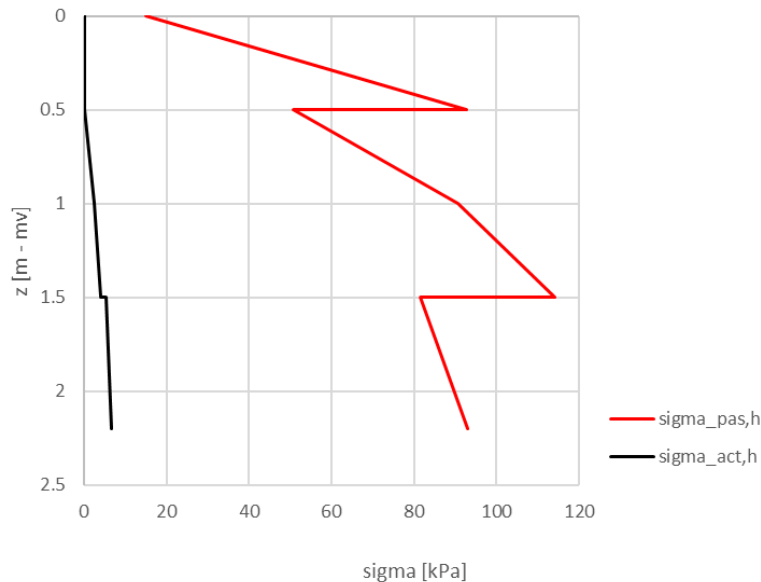
De weerstand van de lier bestaat uit de weerstand van het grondschot en de wrijvingsweerstand van de lier op de ondergrond.

De weerstand van het grondschot wordt bepaald door de grondopbouw over de totale hoogte, dit in tegenstelling tot de weerstand van de leiding en de ploeg die voornamelijk worden bepaald door de grondeigenschappen van de laag waarin de leiding komt te liggen.

Tabel D.1 3 Berekening weerstand schot.

z [m – mv]	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kPa]	$K_{pas,h}$ [-]	$K_{act,h}$ [-]	σ'_v [kPa]
0	17	35	2,5	0,22	9,15	0
0.5	17	27,5	2,5	0,31	4,70	8,5
1	20	22,5	2,5	0,38	3,30	17
1.5	15	22,5	2,5	0,38	3,30	22
2.2						25,5

Ter illustratie is in Figuur D.1 6 het verloop van de passieve gronddruk (horizontale component) over de hoogte van het schot weergegeven.



Figuur D.1 6 Verloop passieve gronddruk over hoogte schot.

Hiermee wordt de weerstand van het grondschot:

- $F_{\text{passief,hor}} = 174,7 \text{ kN/m}$.
- $F_{\text{actief,hor}} = 6,4 \text{ kN/m}$.

De netto weerstand is daarmee $F_{\text{schot}} = 168,3 \text{ kN/m}$.

Met een breedte van $B_{\text{schot}} = 3\text{m}$ en een schelpfactor van $S = 1,18$ geeft dit als weerstand: $F_{\text{schot}} = 597,4 \text{ kN}$.

Daarnaast levert het eigen gewicht van de lier een bijdrage aan de weerstand. Hier wordt alleen de wrijving over de ondergrond meegenomen. Voor de wrijvingscoëfficiënt tussen machine en ondergrond wordt $f = 0,25$ gekozen. Verder wordt geen rekening gehouden met de verticale kracht die mogelijk vanuit het grondschoop op de lier wordt uitgeoefend. Daarmee wordt de wrijvingsweerstand $F_{\text{wrijving}} = 0,25 \cdot 275 = 68,8 \text{ kN}$.

De totale weerstand die de lier kan leveren is daarmee: $666,1 \text{ kN}$.

D.6 Sommatie krachten

De verschillende componenten in de krachtswerking zijn in Tabel D.1 4 weergegeven.

Tabel D.1 4 Overzicht berekende krachten.

Onderdeel	Kracht [kN]
leiding	370 (gemeten) / 846 (berekend)
ploeg	93,3
weerstand lier	666,1

De weerstand die de lier kan leveren is dus meer dan de som van de gemeten weerstand op de leiding en de weerstand van de ploeg, maar minder dan de som van de berekende weerstand op de leiding en de berekende weerstand van de ploeg. Het effect van de coating

op de wrijving bij het intrekken is niet goed bekend. Daardoor is een toch hoge leiding weerstand berekend.

E Modelling effect tijd op wrijvingsweerstand leiding

E.1 Beschikbare meetwaarden

Tijdens de inploegproeven heeft de leiding ongeveer 2 uur stilgelegen tijdens het graven van de proefsleuven. Het verschil in intrekkracht voor en na deze periode van stilstand wordt gebruikt om het tijdseffect te kwantificeren. De onderstaande tabel vat de resultaten samen.

Tabel E.1 1 Weerstandsverandering door tijdseffecten, inploegproef.

locatie	grondslag	Diameter leiding [inch]	meting		
			τ_{in} [kPa]	τ_{uit} [kPa]	verhouding
Biddinghuizen	klei, onverzadigd	12	5.9	11.57	1.96
	zand, onverzadigd	12	3.49	6.24	1.79
	zand, verzadigd	12	3.28	3.82	1.16
Sliedrecht	veen	12	1.09	0.87	0.80
	veen	12			
	veen	24	0.78	1.44	1.85
	veen	28	0.8	1.51	1.89

Gemiddelde neemt weerstand bij een 2 uur durende stilstand toe met een factor 1,57.

Voor veen is er een tendens dat de gemeten weerstand bij intrekken iets afneemt met de diameter en bij herstart iets toeneemt. Of dit inderdaad een gevolg is van de verandering in de diameter of van de grootte van de oversnijding bij de torpedo is niet nader onderzocht.

Voor het bepalen van de toename voor de lange duur zijn geen meetgegevens beschikbaar. Daarom wordt uitgegaan van de berekende toename. In paragraaf C.1.2 en C.1.3 wordt de wrijvingsweerstand berekend voor de situaties tijdens de inploegproeven. Tabel E.1 2 vat de resultaten samen.

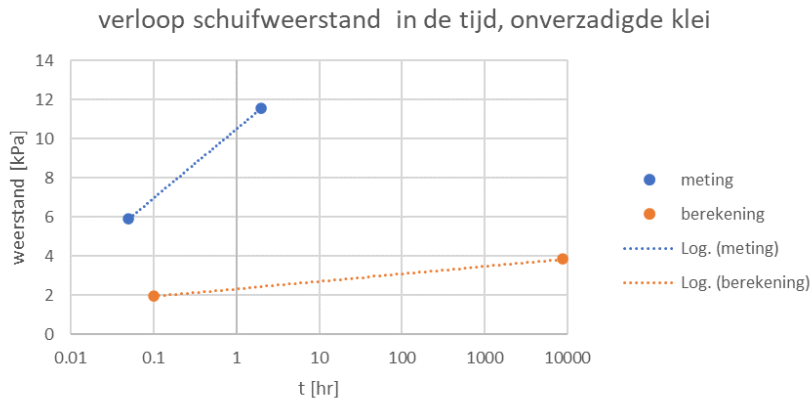
Tabel E.1 2 Weerstandsverandering door lange termijn tijdseffecten, volgens berekening.

locatie	grondslag	Diameter leiding [inch]	berekening		
			$\tau_{intrekken}$ [kPa]	$\tau_{bedrijfsfase}$ [kPa]	verhouding
Biddinghuizen	klei, onverzadigd	12	1.95	3.85	1.97
	zand, onverzadigd	12	3.89	8.43	2.17
	zand, verzadigd	12	3.34	7.69	2.30
Sliedrecht	veen	12	1.33	1.53	1.15
	veen	24	0.89	1.47	1.65
	veen	28	0.91	1.44	1.58

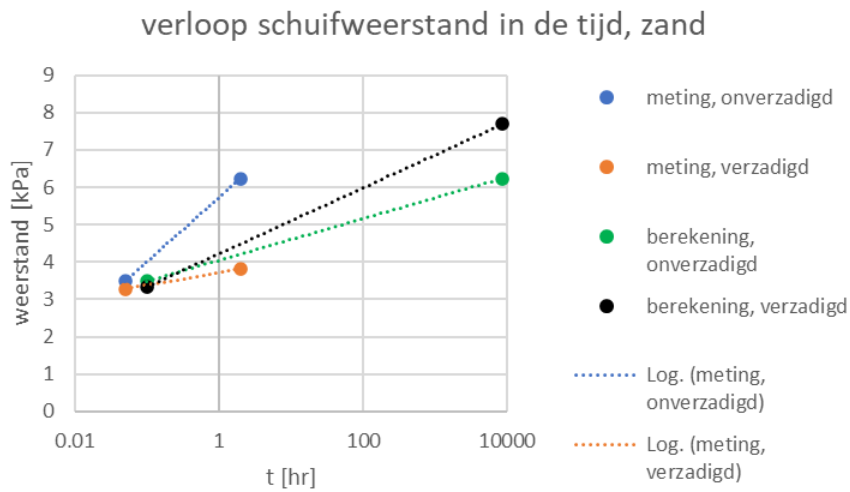
Met de data uit de voorgaande tabellen zijn grafieken met het verloop in de tijd gemaakt.

Daarbij zijn de volgende tijdstippen voor de verschillende metingen of berekeningen gebruikt:

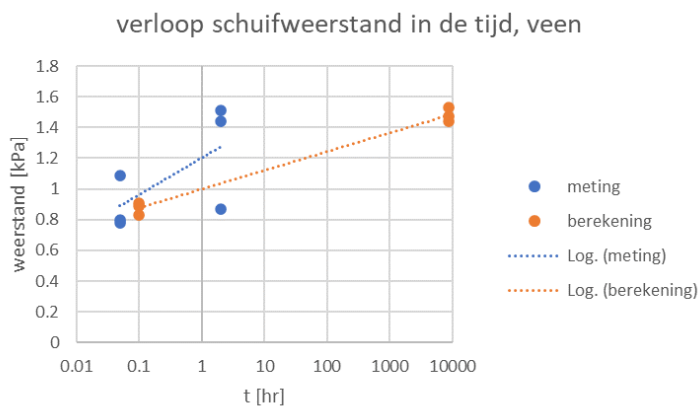
- Meting, intrekken: $t = 0,05$ hr.
- Meting, uittrekken: $t = 2$ hr.
- Berekening, aanleg: $t = 0,1$ uur.
- Eindfase: $t = 1$ jaar (8760 uur).



Figuur E.11 Verandering weerstand in de tijd bij onverzadigde klei.

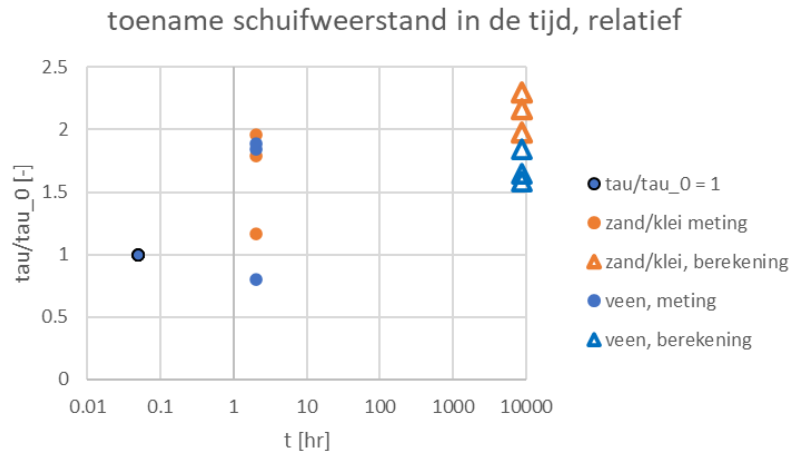


Figuur E.12 Verandering weerstand in de tijd bij zand.



Figuur E.13 Verandering weerstand in de tijd bij veen.

Als poging om verder inzicht te krijgen is ook de relatieve verandering (de relatieve toename) van de weerstand als functie van de tijd grafisch weergegeven.



Figuur E.1 4 Relatieve verandering weerstand in de tijd.

Uit de voorgaande tabel en de voorgaande grafieken volgt:

- Bij veen is er weinig verschil in de gemeten weerstand na 2 uur en de berekende eindweerstand.
- Bij verzadigd zand is de toename van de weerstand in de eerste 2 uur beperkt.
- Bij onverzadigd zand en onverzadigde klei is er sprake van een sterke toename van de weerstand in de eerste 2 uur.
- Bij zand en (onverzadigde) klei is er in begin sterke toename weerstand, waarna deze nog langzaam in de tijd toeneemt.
- Weerstand neemt toe in de tijd, de toename is ongeveer een factor 1,8 na 2 uur en 2 voor de gebruiksfase.

E.2 Afleiding model effect lange duur

Uit de uitgevoerde metingen volgt dat de toename van de weerstand na 2 uur een factor 1,5 is. Uit de berekende weerstand volgt voor de lange termijn een toename van de weerstand met een factor 1,8.

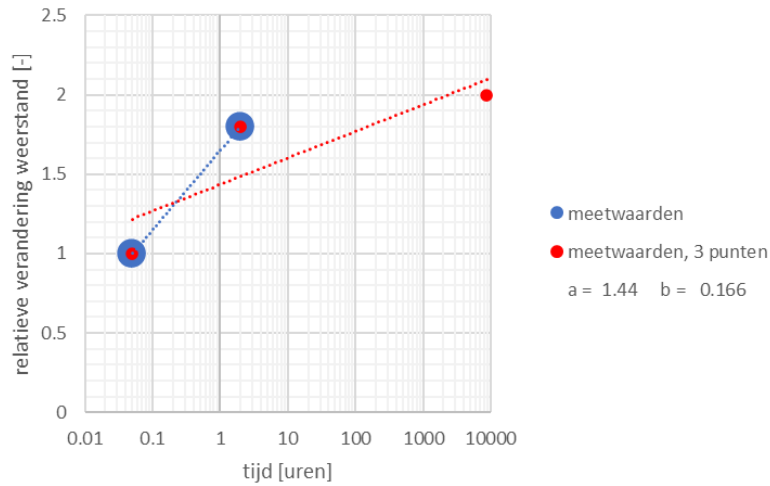
Als begin hypothese wordt verondersteld dat de toename logaritmisch met de tijd verloopt. Daarmee wordt de functionele vorm voor de tijdsfactor

$$C_t = a + b * \log(t/t_0)$$

Met:

- C_t Toename sterkte in de tijd (relatief).
- a, b Empirische factoren.
- t Tijd.
- t_0 Referentie tijd, geen fysische betekenis.

Figuur E.1 5 toont het verloop van de relatieve verandering van de weerstand in de tijd.



Figuur E.15 Relatieve verandering weerstand in de tijd.

De functionele vorm $C_t = a + b \cdot \log(t/t_0)$ blijkt de meetwaarden niet goed te beschrijven. Daarom is als alternatief ook de volgende functionele vorm beschouwd:

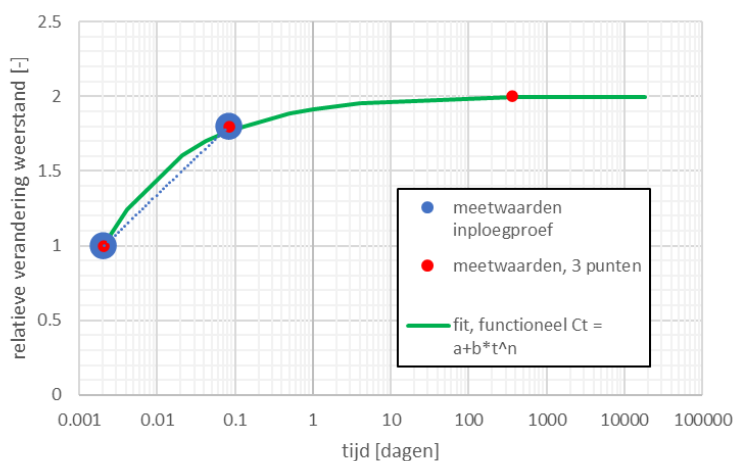
$$C_t = a + b \cdot (t/t_0)^n$$

Een nadeel van deze functionele vorm is echter dat voor grote waarden van t de waarde van C_t bij bepaalde combinaties van parameters weer kan afnemen. Hiermee wordt bij het bepalen van de empirische parameters rekening gehouden zodat in ieder geval voor een duur van $t = 50$ jaar de formule geen of in ieder geval geen noemenswaardige afname van de parameter C_t geeft.

Fitten van de empirische parameters volgens deze meetwaarden geeft het volgende resultaat:

- $t_0 = 1$ uur.
- $n = -0,4$.
- $a = 2,0$.
- $b = -0,3$.

Figuur E.1 6 geeft grafisch dit verloop weer.



Figuur E.1 6 Vergelijking verloop toename schuifweerstand in de tijd volgens gefitte formule en volgens meetwaarden.

E.3 Effect lange leiding

Hoe langer de leiding, hoe langer de tijdsduur nodig voor het intrekken van een streng. Dit betekent dat voor langere leidingen het tijdseffect een rol kan spelen voor de grootte van de wrijvingsweerstand. In deze paragraaf wordt een model opgesteld om die invloed te kwantificeren. De basis hiervoor is het in paragraaf E.2 opgestelde model voor het tijdseffect.

De snelheid van intrekken is minder dan wandelsnelheid. De data van april 2022 geven snelheden in de orde van 0,1 m/s. Voor een streng van 400 m is de tijdsduur dan $4000 \text{ s} \approx 1$ uur. Dat zou ook al een toename van de weerstand met een factor 1,7 geven.

Een iets verfijndere benadering is om een gemiddelde toename van de weerstand langs het tracé van de leiding te berekenen. De aanpak is dan:

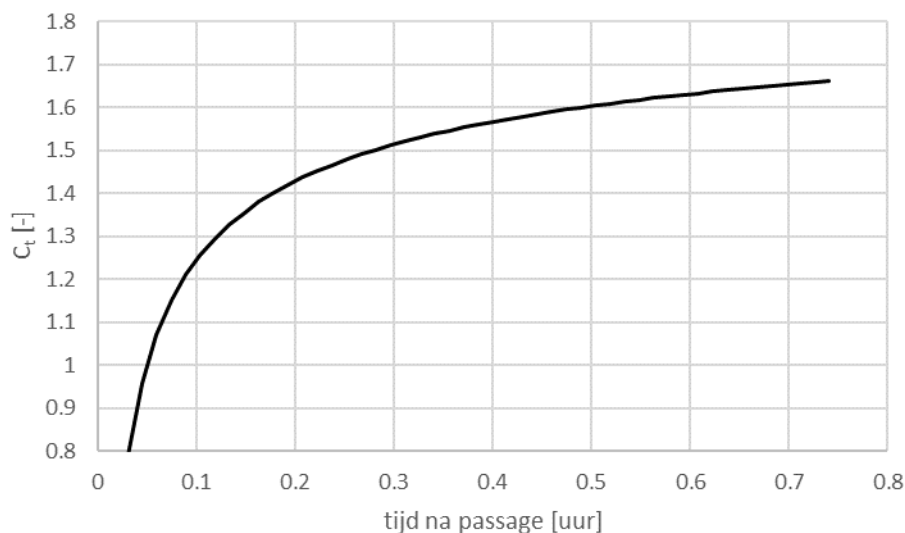
- Kies een lengte, snelheid en empirische parameters a en b .
- Bepaal voor elk punt van het tracé (niet van de leiding) hoelang het geleden is dat de ploeg dat punt is gepasseerd.
- Bepaal daarmee voor dat punt de waarde van C_t .

Dit geeft een verloop van de waarde van C_t langs het gehele tracé. Middeling hiervan over de lengte geeft dan de gemiddelde waarde van C_t waarmee de grootte van de wrijvingsweerstand kan worden bepaald.

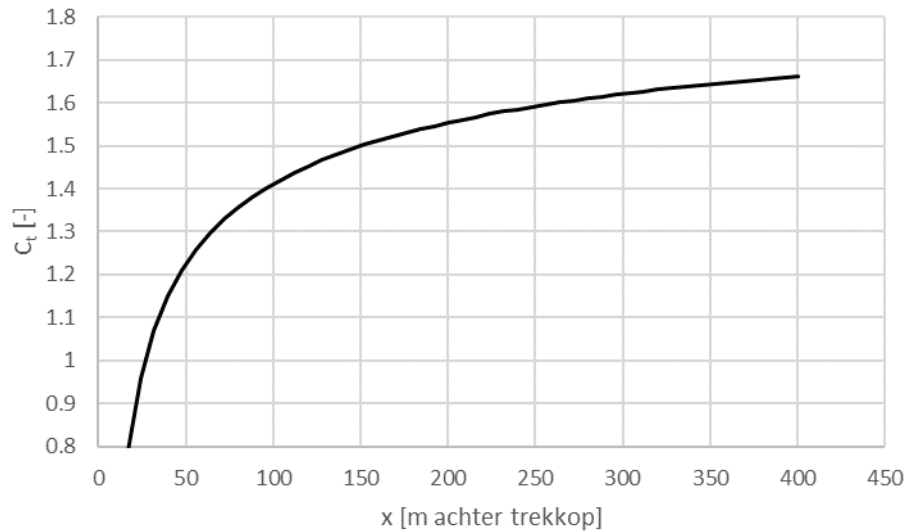
De procedure wordt hier met een voorbeeld geïllustreerd. Beschouwd wordt de volgende situatie:

- $L = 400 \text{ m}$.
- $v = 0,15 \text{ m/s}$.
- $a = 2$; $b = -0,3$; $n = -0,4$.

De tijdsduur van intrekken is hierbij $T = 400/0,15 = 2667 \text{ s}$ (0,74 uur). Figuur E.1 7 geeft het verloop van C_t in deze periode. Figuur E.1 8 geeft dezelfde waarde, maar dan als functie van de afstand.



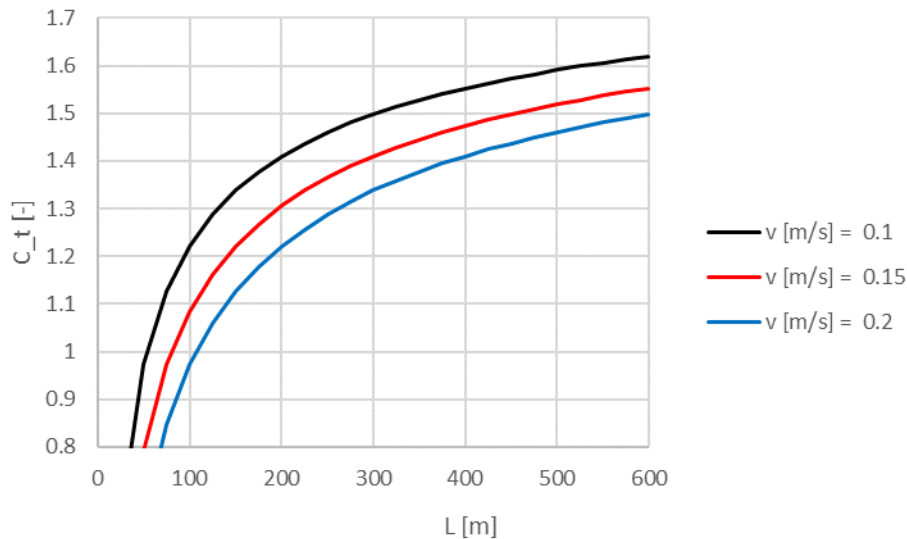
Figuur E.1 7 Verloop parameter C_t als functie tijd bij intrekken.



Figuur E.1 8 Verloop parameter C_t als functie plaats bij intrekken.

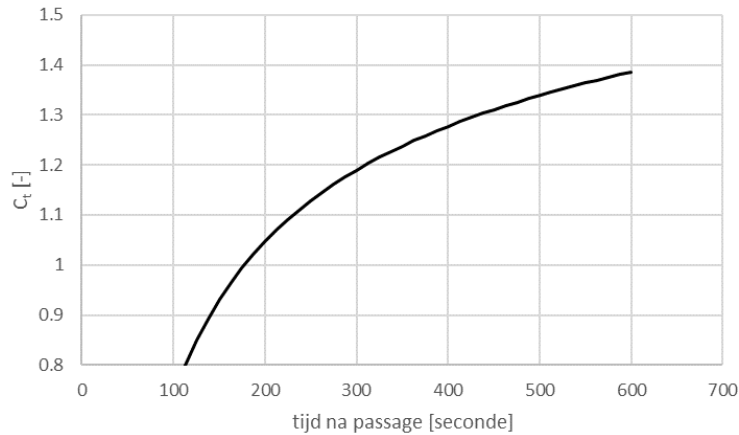
Met het voorgaand model kan ook de gevoeligheid voor lengte en intreksnelheid worden bepaald. Figuur E.1 9 geeft het resultaat van zo'n berekening. Hierbij is voor iedere afstand achter de kop de verstreken tijd bepaald (volgens $t = x/v$ met x de afstand achter de ploeg). Met deze tijd is vervolgens voor ieder punt de parameter C_t bepaald. Dat geeft een verloop van C_t met de afstand achter de ploeg. Middeling van die waarden geeft vervolgens de in rekening te brengen gemiddelde waarde van C_t . Daarmee kan de trekkracht bij de trekkop worden bepaald.

Een verfijning is om het verloop van de wrijvingsweerstand met de afstand mee te nemen, maar omdat de grootste trekkracht altijd bij de trekkop aanwezig is, is dat voor het ontwerp verder niet relevant. Alleen voor de situatie dat de afmetingen van de leiding over het in te trekken gedeelte variëren is het echte verloop van de weerstand van belang. Maar die situatie zal in de praktijk zelden tot nooit aanwezig zijn.



Figuur E.1 9 Gevoeligheid parameter C_t voor lengte en intreksnelheid.

Tot slot wordt met dit model het mogelijke tijdseffect tijdens de inploegproeven bepaald. Hierbij wordt uitgegaan van een lengte van 50 m en een intreksnelheid van 0,1 m/s. Figuur E.1 10 geeft het resultaat. De gemiddelde waarde is $C_t = 0,97$. Dit is een fractie minder dan de gebruikte waarde van $C_t = 1$ bij de analyse van de meetresultaten. Dit betekent dat er modelmatig sprake is van een marginale onderschatting van het tijdseffect.



Figuur E.1 10 Bepaling tijdseffect tijdens de inploegproeven.

Bij de situatie dat het trekken langdurend (4 dagen) wordt onderbroken geeft de uitdrukking voor het tijdseffect een toename van de weerstand met een factor van 1,95. Voor een meer realistische tijdsperiode van 12 uur is het 1,9. Een realistische veronderstelling is dus om een toename van een factor 2 te nemen voor het effect van mogelijke stilstand.

Benadrukt wordt dat bij de analyse van het tijdseffect er voor de gebruiksfase sprake is van extrapolatie. Dit model kan daarom niet worden gebruikt om vanuit de gemeten weerstand tijdens het intrekken de weerstand tijdens de gebruiksfase te bepalen. Verder is in het model geen rekening gehouden met de mogelijke doorgaande verkneding op het grensvlak leiding-grond, waardoor voor de intrekfase van lange leidingen de weerstand volgens dit model mogelijk wordt overschat. Voor de controle van de krachten tijdens het intrekken is dat een veilige aanname.

E.4 Effect lange duur, best-estimate waarden voor ontwerp

Op basis van de voorgaande analyses worden de volgende waarden voorgesteld voor het ontwerpen van ingeploegde leidingen.

- Aanlegfase
 - Voor de situatie kort achter de torpedo (geen tijdseffect, $C_t = 1$): volgens model intrekken.
 - Continu intrekken: tijdsfactor $C_t = 1,5$.
 - Bij stilstand van meer dan 0,5 uur en minder dan 2 uur: tijdsfactor $C_t = 1,8$.
 - Bij stilstand van 12 uur of langer: 2,0.
- Gebruiksfase
 - Volgens model gebruiksfase (geen C_t nodig).

F Waarden trekkracht lier

Tijdens de testen is de uitgeoefende trekkracht door de lier niet continu vastgelegd. Na afloop is door de machinist mondeling de maximale waarde doorgegeven. In de onderstaande tabel zijn de opgaves van de lier trekkrachten beschouwd. Voor test van 25 januari bij Sliedrecht is van de situatie met 1 lier uitgegaan. Bij die test is de ploeg op een boomstam gestuit, waardoor er een grotere trekkracht, en daardoor een extra lier, nodig was. Deze situatie is in deze analyse niet meegenomen.

Tabel F.1 1 Bepaling weerstand ploeg.

proef		Biddinghuizen			Sliedrecht		
		19-jan	19-jan	20-jan	24-jan	25-jan	6-april
Datum test							
D [duim]		12"	12"	12"	12"	24"	28/24"
$F_{\text{ploeg}} = F_{\text{lier}} - F_{\text{leiding}}$ [kN]	intrekken	672	723	831	341	332	geen data
	uittrekken	412	643	806	351	308	geen data
$F_{\text{ploeg}}/F_{\text{lier}}$	intrekken	0.71	0.82	0.85	0.87	0.77	
	uittrekken	0.44	0.73	0.82	0.90	0.71	

Uit de tabel blijkt dat de weerstand van de ploeg opvallen hoog is. Voor een deel kan dat komen door een te hoge opgegeven waarde voor de kracht van de lier. Anderzijds wordt in de tabel de tractie van de ploeg niet meegenomen, waardoor de weerstand van de ploeg weer wordt onderschat.

Ook valt op dat bij uittrekken de weerstand kleiner is, met name in de onverzadigde klei. Daarvoor is geen verklaring gevonden. Het geeft wel aan dat de betrouwbaarheid van de afgeleide waarden beperkt is.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl