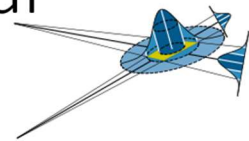


De nauwkeurigheid van een horizontaal gestuurde boring

De afwijking van een boorlijn



Nauwkeurig horizontaal
gestuurd boren



De nauwkeurigheid van een horizontaal gestuurde boring

De afwijking van een boorlijn

Auteur(s)

Hans Landwehr

De nauwkeurigheid van een horizontaal gestuurde boring

De afwijking van een boorlijn

Opdrachtgever	TKI Deltatechnologie p/a Vereniging van Waterbouwers
Referenties	Nauwkeurig Boren
Trefwoorden	Horizontaal gestuurde boring, HDD, meetsysteem, nauwkeurigheid, afwijking

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	04-03-2025
Projectnummer	11207104-013
Document ID	11207104-013-GEO-0002
Pagina's	43
Status	definitief

Auteur(s)		
	Hans Landwehr	Henk Kruse

Samenvatting

Horizontaal gestuurd boren (horizontal directional drilling, HDD) is de snelst groeiende techniek voor het sleufloos aanleggen van kabels en leidingen. Met deze techniek is het mogelijk kabels en leidingen onder wegen, dijken, waterwegen, spoorlijnen en andere constructies aan te leggen. De laatste tijd wordt horizontaal gestuurd boren ook vaak toegepast in dichtbevolkte gebieden, wanneer de ruimte voor het graven van sleuven niet beschikbaar is of wanneer verkeershinder onwenselijk is en wegen niet mogen worden opengebroken of niet mogen worden afgezet.

In het kader van de vervangingsopgave van de verouderende ondergrondse infrastructuur en de energie transitie zal in de toekomst nog vaker gebruik worden gemaakt van horizontaal gestuurd boren in stedelijk gebied. Vanwege de beperkt beschikbare ondergrondse ruimte zullen de eisen die in de toekomst aan het sleufloos installeren van kabels en leidingen worden gesteld, steeds hoger worden. Om schade te vermijden zal er meer en meer precies moeten worden gewerkt, zonder dat er schade aan de te installeren infrastructuur en de omringende ondergrondse en bovengrondse infrastructuur wordt toegebracht.

Om de nauwkeurigheid van een HDD in beeld te kunnen brengen en daarmee de kans op schade aan andere infrastructuur te kunnen beoordelen, is het nodig om zowel de meetnauwkeurigheid van de locatie van de boorkop en de te installeren leiding te weten, maar ook de grootte van de afwijkingen door boorproces als gevolg van de samenstelling van de ondergrond te beschouwen. De afwijking bij een horizontaal gestuurde boring bestaat uit twee componenten die bij elkaar moeten worden opgeteld:

- Afwijking door boorproces en ondergrond.
- Afwijking door meetsysteem.

In Nederland is in het gebied met sedimentaire grondsoorten een afwijkingsanalyse gedaan aan de hand van de gegevens van de uitgevoerde HDD-projecten. Voor de HDD-projecten is de afwijking van de geïnstalleerde leidingen ten opzichte van de beoogde ontwerpligging bepaald. De afwijkingsanalyse werd mogelijk gemaakt door de beschikbaarheid van meetgegevens van 25 horizontaal gestuurde boringen in een database. De analyseresultaten laten zien dat de totale afwijking voor het merendeel van de horizontaal gestuurde boringen in de sedimentaire gronden in Nederland kleiner is dan 1,5 m. Twee horizontaal gestuurde boringen in de database laten een grotere afwijking zien van meer dan 3 m.

De oorzaken voor de gemeten afwijkingen zijn geanalyseerd. De mechanismen die de afwijkingen veroorzaken zijn vastgesteld. De belangrijkste mechanismen zijn uitgekozen om verder uit te werken in een model. Deze mechanismen zijn in de verschillende sessies met diverse specialisten zijn uitgewerkt:

- A) Veranderingen in bodemeigenschappen door overgangen van grondlagen.
- B) Opdrijven en zinken door het gewicht van de downhole tools en de leiding in de boorgaten.
- C) Insnijden in de bochten door de bocht reactie tijdens uitoefenen van een trekkracht.
- D) Bocht werking door de interactie van de boorkop en de stijfheid van de boorstreng.
- E) Insluitingen en objecten in de ondergrond.

Deze mechanismen zijn modelmatig uitgewerkt, zodat een voorspelling van de te verwachten afwijking mogelijk is. Hierbij is ook de stuurreactie van de boormeester op de waargenomen afwijkingen tijdens het boren meegenomen. De modelering van de stuurreactie van de boormeester is een zogenaamde 'digital twin' benadering.

De afwijking die kan ontstaan door het meetsysteem moet bij de afwijking door boorproces en ondergrond worden opgeteld. Voor de meetsystemen bij horizontaal gestuurde boringen geldt op basis van literatuuronderzoek:

- Gyroscop, afwijking is ongeveer 0,1 % van de lengte.
- Magnetisch, afwijking is ongeveer 2% van de diepte.
- Walk-over, afwijking is ongeveer 5% van de diepte.

In de literatuur wordt aangegeven dat door aanvullende metingen te verrichten er lokaal op een bepaalde positie een hogere nauwkeurigheid kan worden bereikt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Algemeen	8
1.2	Achtergrond	8
1.3	Doelstelling	9
1.4	Werkwijze	9
1.5	Samenwerking	9
2	Meetsystemen	10
2.1	Algemeen	10
2.1.1	Pilotfase	10
2.1.2	Ruimfase	11
2.1.3	Intrekken productleiding	13
2.2	Meetapparatuur	13
2.2.1	Historie	13
2.2.2	Walk-over	14
2.2.3	Magnetic	14
2.2.4	Gyroscoop	15
2.3	Toepassing van meetsystemen	16
2.4	Toekomstige ontwikkelingen	16
2.5	Nauwkeurigheid meetsystemen	17
3	Afwijking door boorproces in de ondergrond	18
3.1	Algemeen	18
3.2	Database HDD-metingen en verwerking	19
3.2.1	Aangeleverde informatie HDD's	19
3.2.1.1	Weergave van de invoer	19
3.2.1.2	Offset correcties	20
3.2.1.3	Transformatie naar lokaal assenstelsel	20
3.2.1.4	Gemeten parameters	21
3.2.1.5	Weergave boorlijnen in lokaal assenstelsel	22
3.2.1.6	Weergave boorlijnen HDD's met coördinaat langs de ontwerplijn	23
3.2.1.7	Statistische bewerking van de coördinaat series	25
3.2.2	Conclusie	26
3.3	Afwijkingen door boorproces en ondergrond	26
3.3.1	Algemeen	26
3.3.2	Mechanisme A Laagovergang; Pilot schuin doorsnijden laagscheiding	27
3.3.2.1	Bouwstenen model	27
3.3.2.2	Bijdrage 1; stijfheidsverhouding grondlagen	27
3.3.2.3	Bijdrage 2; boorhoek α_{verlaat}	27
3.3.2.4	Bijdrage 3 ; referentiehoek θ_{max}	28
3.3.2.5	Compleet model mechanisme A	28

3.3.3	Mechanisme B; Zinken & Opdrijven	28
3.3.3.1	Relevantie voor BHA, ruimer en leiding	28
3.3.3.2	Bocht door boorkop	29
3.3.3.3	Bijdrage uit overcut (OC)	29
3.3.3.4	Grond samendrukking	29
3.3.3.5	Bijdrage uit uitspoeling van grond	30
3.3.3.6	Compleet model mechanisme B	31
3.3.4	Mechanisme C; Insnijden bochten	31
3.3.4.1	Motivatie modellering	31
3.3.4.2	Model in bocht zelf	31
3.3.4.3	Rand van model; overgang bocht naar recht	33
3.3.5	Mechanisme D; Pilot minimale boogstraal	33
3.3.5.1	Methode om bocht te maken bij pilot boring	33
3.3.5.2	Minimale boogstraal	33
3.3.5.3	Voorbeeld minimale boogstraal > ontwerp boogstraal	34
3.3.6	Mechanisme E; Insluitingen in ondergrond	35
3.3.6.1	Modellering	35
3.3.6.2	Kei	36
3.3.6.3	Boorstreng en boorgang	36
3.3.6.4	Interactie kei en boorstreng	36
3.3.6.5	Bijsturen na botsing	37
3.3.6.6	<i>Statistiek</i>	38
3.3.7	Mechanisme Z; bijsturen boormeester	39
3.3.7.1	Randvoorwaarden	39
3.3.7.2	Meting positie boorkop	39
3.3.7.3	Sturing positie boorkop	39
3.3.7.4	Drempelwaarde bijsturen	40
3.3.7.5	Sturen boorkop met kromming Kappa	40
3.3.7.6	Bepaling volgende positie boorkop	41
4	Conclusies	42

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Horizontaal gestuurd boren (horizontal directional drilling, HDD) is de snelst groeiende techniek voor het sleufloos (Trenchless Technology) aanleggen van kabels en leidingen. Met deze techniek is het mogelijk kabels en leidingen onder wegen, dijken, waterwegen, spoorlijnen en andere constructies aan te leggen zonder te hoeven graven. De laatste tijd wordt horizontaal gestuurd boren ook vaak toegepast in dichtbevolkte gebieden wanneer de ruimte voor het graven van sleuven niet beschikbaar is of wanneer verkeershinder onwenselijk is en wegen niet mogen worden opengebroken of niet mogen worden afgezet. In het kader van de vervangingsopgave van de verouderende ondergrondse infrastructuur en de energie transitie zal in de toekomst nog vaker gebruik worden gemaakt van horizontaal gestuurd boren in stedelijk gebied. Vanwege de beperkt beschikbare ondergrondse ruimte zullen de eisen die in de toekomst aan het sleufloos installeren van kabels en leidingen worden gesteld, steeds hoger worden. Om schade te vermijden zal er meer en meer precies moeten worden gewerkt, zonder dat er schade aan de te installeren infrastructuur en de omringende ondergrondse en bovengrondse infrastructuur wordt toegebracht.

De aanleg van een of meerdere leidingen met de HDD techniek kenmerkt zich door 3 boorfases. Elke aanlegfase (pilotboring, ruimen, intrekken leiding) heeft invloed op de nauwkeurigheid van de leiding aanleg. Vaak wordt na de aanleg van de leiding (en) een nameting van de ligging van de geïnstalleerde leiding(en) gedaan.

1.2 Achtergrond

De gerealiseerde ligging van een met de horizontaal gestuurde boring methode aanlegde leiding zal in de praktijk altijd afwijken van de theoretische ontwerpboorlijn. Dit komt door de meetonnauwkeurigheid van de locatie van de boorkop, maar ook de grootte van de afwijkingen door het boorproces en de invloed van de ondergrond.

Bij de afwijking spelen de volgende aspecten een rol:

- Meten van de locatie van de boorkop met een meetsysteem.
- Tijdens de pilot boring wordt met een meetsysteem de positie van de boorkop (of eigenlijk enige afstand achter de boorkop) vastgesteld. Afhankelijk van het gekozen meetsysteem is er een bepaalde onnauwkeurigheid over de ligging in diepte en in het horizontale vlak.
- Het sturen van de boorkop aan de hand van meetgegevens van het meetsysteem.
- Het stuursysteem bestaat uit een combinatie van het boormaterieel, de wijze waarop de meetinformatie door de surveyor wordt verwerkt, en de werkwijze van de boormeester bij het bijsturen.
- Ruimen van het boorgat en intrekken van de leiding.
- Tijdens het ruimen en intrekken van de productleiding(en) is er een boorgat. De interactie tussen de boorequipment en de ondergrond tijdens het boorproces heeft invloed op de uiteindelijke ligging van de leiding(en) na afloop van alle boorfases.
- Na meting van de leiding na de installatie.
- Vaak wordt na afloop een nameting gedaan van de ligging van de boorlijn. Afhankelijk van het gekozen meetsysteem is er een bepaalde onnauwkeurigheid over de geconstateerde ligging in de diepte en in het horizontale vlak.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is om de nauwkeurigheid van een horizontaal gestuurde boring in beeld te brengen.

Om de nauwkeurigheid van een HDD in beeld te kunnen brengen en daarmee de kans op schade aan andere infrastructuur te kunnen beoordelen, is het nodig om zowel de meetnauwkeurigheid van de locatie van de boorkop, maar ook de grootte van de afwijkingen door het boorproces en de samenstelling van de ondergrond te beschouwen.

1.4 Werkwijze

De locatie metingen die tijdens een horizontaal gestuurde boring worden uitgevoerd zijn beschreven in hoofdstuk 2. De nauwkeurigheid van de metingen wordt beschreven aan de hand van literatuuronderzoek. In hoofdstuk 3 worden de meetresultaten van een aantal uitgevoerde HDD projecten inzichtelijk gemaakt. Hieruit is de afwijking bij de uitgevoerde projecten afgeleid in hoofdstuk 3.2. De afwijkingen en de oorzaken van de afwijkingen zijn door specialisten beschouwd. De mechanismen die bij de oorzaken van de afwijkingen een rol spelen zijn geanalyseerd. De belangrijkste mechanismen zijn verder in detail beschouwd en gemodelleerd om voorspelling van de afwijking mogelijk te maken in hoofdstuk 3.3.

1.5 Samenwerking

Het TKI onderzoek Nauwkeurig horizontaal gestuurd boren is uitgevoerd door de volgende participanten:

- Gasunie.
- NSTT De Nederlandse vereniging voor Sleufloze Technieken en Toepassingen.
- Van Leeuwen sleufloze technieken.
- Van Vulpen.
- Brownline drill guide.
- TUDelft.
- Holland Drilling.
- Arkance systems.
- Deltares.

2 Meetsystemen

2.1 Algemeen

De aanleg van leiding(en) middels een HDD kenmerkt zich door de 3 uitvoeringsfasen. Dit betreffen de pilotboring, de ruimfase en het intrekken van de productleiding(en). In onderstaande paragrafen zullen de fases worden toegelicht met aandacht voor aspecten die de nauwkeurigheid kunnen beïnvloeden.

2.1.1 Pilotfase

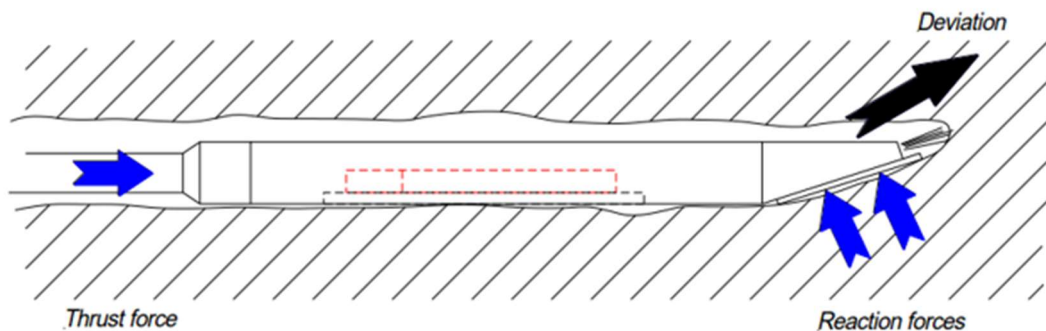
In het ontwerp loopt het tracé van de HDD van het intredepunt (entry point) naar het uittredepunt (exit point). Bij het intredepunt is een boorstelling (boor rig) aanwezig die de boorkop en achterliggende aangekoppelde boorstangen onder een hoek de grond in zal drukken. Aan de voorkant van de boorstang is een boorkop aangebracht. De boorkop wordt aangedreven door de boorstangen. De boorkop maakt de grond los en vermengt deze met boorvloeistof. De boorspoeling wordt via de boorstang naar de boorkop getransporteerd en wordt samen met de losgewoelde grond langs de buitenzijde van de boorstang door het boorgat afgevoerd.

Over het algemeen zijn er twee systemen van boorkoppen waarmee kan worden gestuurd. Het ene systeem bestaat uit een boorkop met een aanwezige scheve plaat (stuurschoen) en mogelijk scheef geplaatste nozzles waaruit de boorvloeistof spuit. Deze boorkop zit recht in het verlengde van de boorstangen. Het andere systeem heeft een boorkop die onder een kleine hoek van ca. 1-2 graden op de boorstangen is gemonteerd (bentsub). In Figuur 2.1 zijn deze aangegeven.



Figuur 2.1 Boorkoppen (links met 3 voorbeelden van een stuurschoen, rechts bentsub).

De boorkop is verbonden met de boorbuizen (boorstang genoemd). De steering tool achter de boorkop bevat sensors voor het meten van de stand van boorkop/bentsub. De boorstelling roteert de stangen en boorkop wanneer deze een rechte lijn wil volgen. Wanneer een bocht moet worden ingezet wordt de boorkop in de juiste positie gezet. De boorkop ondervindt een grondreactie en zal vervolgens met een boog zijn weg vervolgen (zie Figuur 2.2).



Figuur 2.2 Sturen bij boorkop door creëren van reactie bij positie boorkop (voorbeeld standaard boorkop met stuurschoen).

De positie van de boorkop wordt continu of periodiek (bijvoorbeeld na elke boorstang aankoppeling) ingemeten. De informatie van de meting wordt verwerkt door de boor surveyor. De surveyor beoordeelt de informatie in relatie tot de designboorlijn en geeft instructies aan de boormeester die de boorlijn kan aanpassen. Daarbij kan vastgesteld worden of er onderweg voldaan wordt aan randvoorwaarden van bijvoorbeeld diepteligging of ontwijking van objecten terwijl de gemaakte boogstralen kunnen voldoen aan de eisen van de uiteindelijke productleiding(en). In de praktijk komt het voor dat bij een geconstateerde afwijking soms de boorkop over een bepaalde afstand wordt teruggetrokken om vervolgens de gewenste boorlijn te realiseren.

2.1.2

Ruimfase

Nadat de boorkop van de pilotboring bij het uitredepunt boven de grond is gekomen, wordt de boorkop gedemonteerd en wordt op het uiteinde van de boorstreng een ruimer gemonteerd. Vervolgens wordt de boorstreng met ruimer teruggetrokken richting het intredepunt.

Op de ruimer zijn nozzles aanwezig waardoor de boorspoeling naar buiten gespoten wordt. Soms zijn ook beitels aangebracht die de grond loswoelen. De losgemaakte grond wordt langs de buitenzijde van de boorstreng door het geruimde boorgat in de retourstroom van de boorspoeling afgevoerd naar het maaiveld. Achter de ruimer wordt opnieuw een boorstreng gekoppeld, zodat de verbinding tussen in- en uitredepunt behouden blijft. Afhankelijk van de grondslag en de vereiste boorgatdiameter kunnen meerdere ruimeroperaties (met per ruimgang in diameter toenemende ruimerdiameters) achter elkaar worden uitgevoerd.

Er zijn verschillende ruimertypes die kunnen worden toegepast afhankelijk van de grondslag en grondwater condities.

Barrelreamers

Dit ruimertype heeft de vorm van een vat. De ruimer drukt de grond opzij en wordt daarom vooral in cohesieve en slappe grondsoorten toegepast (zie onderstaande figuur).



Figuur 2.3 Voorbeeld van een barrel ruimer.

Fly-Cutters

Hier zijn diverse varianten van ruimers beschikbaar die allen als overeenkomst hebben dat ze actief de diameter vergroten door roterende beitels.



Figuur 2.4 Voorbeeld van een fly-cutter.

Cone shaped reamers

Deze ruimer is beperkter qua afmetingen en heeft een conische vorm waardoor deze in het boorgat gecentreerd blijft.



Figuur 2.5 Voorbeeld cone shaped ruimer.

In de ruimfase wordt alleen aan de boorstang getrokken en wordt niet gestuurd. Er wordt niet gemeten in deze uitvoeringsfase.

2.1.3 Intrekken productleiding

Wanneer de diameter van het gemaakte boorgat naar verwachting voldoende groot is wordt tot slot ter plaatse van het uittredepunt de productleiding aan de boorstang gekoppeld. De productleiding kan een enkele leiding zijn of een bundel van leidingen. Het boorgat blijft in deze fase geheel gevuld met de boorvloeistof. Ten behoeve van het inbrengen van de leiding wordt tussen de ruimer en de leiding een wartellager (swivel) gemonteerd, zodat geen rotatie van de productleiding kan optreden. Op deze wijze worden geen torsiekrachten op de leiding of bundel uitgeoefend tijdens het intrekken.

In deze fase wordt alleen aan de boorstang getrokken en wordt niet gestuurd. In bijzondere gevallen kan de leiding ook worden geduwd.

Nadat de leiding in het geboorde gat is getrokken, is de boring voltooid. Vaak wordt de hartlijn van de ingetrokken productleiding nagemeten.

2.2 Meetapparatuur

2.2.1 Historie

In het verleden werd systeem toegepast met een foto van een loodlijn in de boorkop om te zien welke inclinatie de boorkop had. Later werd er voor de richting nog een eenvoudig kompas ingebouwd, waardoor er ook voor de richting kon worden bepaald welke kant men op boorde. Dit was dus een systeem waarbij op enkele punten gestopt werd met boren en een meting werd uitgevoerd. Deze meting gaf op die locatie een horizontale hoek t.o.v. de zwaartekracht en een richting hoek t.o.v. het kompas noorden. Aan de hand van de geboorde lengte werd zodoende de positie bepaald.

Later werd er een tool ontwikkeld welke door een kabel in de boorstang een horizontale en een verticale hoek kon worden doorgegeven naar het maaiveld. Deze tools werden op locatie gekalibreerd om voor verstoringen te compenseren. Hierdoor konden HDD-boorlijnen langer worden. Door verstoringen onderweg kon de tool afwijkingen geven. Er konden aanzienlijke afwijkingen plaatsvinden.

In de jaren 80 werd vervolgens een systeem ontwikkeld waardoor er op maaiveld een magnetisch veld kon worden gegenereerd wat door de magnetische tool kon worden gedetecteerd. Dit werd later het Tru-track systeem genoemd. Hierdoor werden de afwijkingen kleiner. Maar ook hier kon het systeem behoorlijk last ondervinden van verstoringen. In eerste instantie werd er een rechthoekig kabelnet boven de boorlijn aangelegd welke door wisselstroom werd gevoed.

Later is men overgestapt naar een enkele draad met wisselstroom boven de boorlijn, wat het P2 ofwel Paratracksysteem werd genoemd. Met dit systeem kunnen meerdere metingen in korte tijd worden uitgevoerd. Dit systeem was vooral voor parallelle boringen handig, want de enkele kabel kon veelal in de reeds geboorde eerste leiding worden ingetrokken.

Het optische gyrokompas is geschikt gemaakt voor inbouw in de boorkop. In Nederland heeft Brownline deze ontwikkeling mogelijk gemaakt. Een lichtstraal wordt gesplitst en via verschillend gebogen banen weer gecombineerd. Als de gyroscoop in de tussentijd meer in de richting van een baan dan in die van een andere baan is bewogen kan een faseverschil worden gemeten, waaruit de verplaatsing kan worden afgeleid.

Op dit moment zijn er drie typen meetsystemen in gebruik, de walkover, magnetic en gyro systemen.

2.2.2 Walk-over

Een surveyor gebruikt een compact meetinstrument dat vastgehouden kan worden om de positie van de leiding / boorkop vaststellen. Het principe is een sonde die in de boorkop is opgenomen welke een elektromagnetisch signaal uitzendt. Dit signaal wordt door een ontvanger (de walk over) opgevangen.

De sondes kunnen steeds meer gegevens verzenden, en geven naast informatie over de diepte ook info over de stand van de boorkop zoals pitch (de verticale hoek van de boorkop) en roll (hoek rondom de as in horizontale richting).

Hoe dieper de boring is hoe sterker het signaal moet zijn om nog op maaiveld op te vangen, en hoe lastiger het is om de juiste locatie te bepalen. Tevens is het systeem voor langere boringen lastig, aangezien de batterij een beperkte tijd voldoende stroom kan leveren. De walk over systemen worden steeds beter, en hebben steeds meer functies om verstoringen te detecteren of soms zelfs gedeeltelijk te elimineren.



Figuur 2.6 Walk over systeem.

Bij boringen van dieper dan 10- 20 m wordt het echter zeer lastig om nog een signaal op te vangen. In de praktijk wordt voor de walkover systemen rekening gehouden met een afwijking van 2 tot 5% van de diepteligging met een beperkt dieptebereik.

2.2.3 Magnetic

Bij dit systeem worden op het maaiveld kabels gelegd om een magnetisch veld op te wekken. Bij de boorkop wordt dit door een sensor opgevangen. Deze sensor is veelal via een kabel naar het entry point is verbonden met o.a. stroomvoorziening (guide wire).

Het meest gebruikte systeem is tegenwoordig het Paratrack P2 systeem. Voor de nauwkeurigheid van de afstandmeting wordt veelal 2% van de afstand c.q. diepte gegeven.

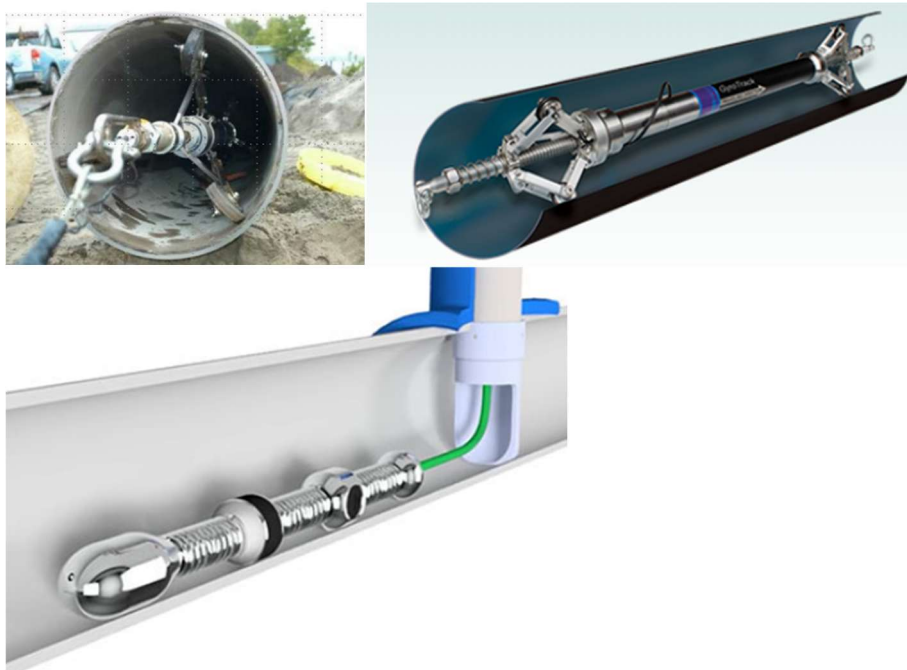
Tijdens een meting ligt de boring stil. Bij dit systeem wordt per meting een dieptepositie bepaald. Er is geen informatie over azimuth (hoek in horizontaal vlak veelal t.o.v. magnetisch noorden) , pitch (hoek in verticale richting) of roll (stand rondom as) die doorgezonden of uitgelezen wordt. Deze informatie wordt berekend uit de voorgaande metingen van de reeds afgelegde weg. Dit houdt in dat het verwerken van deze informatie in stuur instructies kan leiden tot afwijkingen in de positie van de volgende meting (meestal na de volgende boorstang).

2.2.4 Gyroscop

De gyroscop meet azimuth, helling en versnelling. Met een vast startpunt kan daarmee elk volgend punt op basis van deze informatie worden vastgesteld. Deze methodiek heet ook wel 'dead reckoning'. De informatie wordt via een kabel naar het intredepunt geleid. Hier wordt op basis van de doorgezonden data de stuurinformatie vastgesteld. De kabel zorgt ook voor de stroomvoorziening van de gyro.

De gyroscop meting op zich is zeer nauwkeurig met een geringe afwijking vanwege een fundamenteel andere werking waardoor ook het dieptebereik zeer groot is. De afwijking bij een gyroscop betreft een systematische fout die dus met de geboorde lengte blijft toenemen. Daarom wordt soms wel een hybride toepassing met magnetische meetsystemen uitgevoerd om tussentijds een correctie te kunnen uitvoeren op de diepte waardoor de cumulatieve fout wordt gereduceerd.

Voor de as-built positie van de leiding is de gyroscop methode zeer nauwkeurig. Er kan meerdere malen 'heen en weer' worden gemeten. Het meetsysteem meet vaak de aslijn van de leiding via een pig systeem (pipeline inspection gauge) of meet de binnen onderkant van de leiding via een systeem dat over de onderzijde rijdt of wordt geduwd. Voorbeelden zijn in de onderstaande figuur gegeven.



Figuur 2.7 Voorbeelden van nameting gyro pig of probe.

Tijdens het in gebruik zijn van een leiding is het soms nodig metingen uit te voeren met een pig systeem. De productleiding is dan nog vaak gevuld. Ook dan kan een positiebepaling (nameting achteraf) worden uitgevoerd. Hiervoor worden dezelfde gyro systemen gebruikt als hiervoor genoemd.

De gyroscopen zijn gevoelig voor trillingen, maar dat komt in de Nederlandse omstandigheden nauwelijks voor, maar kan bijvoorbeeld in gesteente wel een rol spelen.

2.3 Toepassing van meetsystemen

Bestaande objecten in de ondergrond dienen met voldoende afstand gepasseerd te worden. De nauwkeurigheid van de waarneming kan echter beïnvloed worden door aanwezigheid van objecten die een verstoring veroorzaken. De waarnemingen van de meetsystemen worden met name beïnvloed door magnetische verstoring. Objecten die een magnetische verstoring kunnen geven zijn elektriciteitskabels of kathodische bescherming op leidingen. Maar ook damwanden, spoorlijnen, signaalkabels langs wegen of spoorwegen kunnen verstoringen veroorzaken.

Bij een walk over of magnetisch systeem is kruising van watergangen vaak een probleem. Er is dan een bepaalde lengte waarover deze systemen geen metingen kunnen doen, in verband met de onbereikbaarheid door het water, waardoor over dat deel 'blind' geboord wordt.

Voor de walk over systemen is ervaring nodig. Voor relatief ondiepe boringen waarbij er geen verstoring is, is het systeem eenvoudig toe te passen. Voor diepe HDD-boringen in gebieden met magnetische verstoring is ervaring noodzakelijk. Ook bij de magnetische systemen is een training nodig. Bij boringen met veel verstoring is het ook bij de magnetische systemen noodzakelijk er dat hier rekening mee gehouden wordt, hiervoor is ervaring met het systeem van belang.

Voor de Gyro systemen is eveneens ervaring nodig en zeker voor boringen in rots is ervaring noodzakelijk.

2.4 Toekomstige ontwikkelingen

Er worden steeds meer eisen gesteld aan de nauwkeurigheid van de boringen, en de boringen worden steeds complexer. Boorlijnen met S-bochten, of projecten met een totale bocht van meer dan 100 graden zijn geen uitzondering meer. Momenteel nemen ook het aantal langere boringen met toepassing van intersect boringen toe. In stedelijke gebieden is de toelaatbare afwijking gering.

Er wordt dan gezocht naar mogelijkheden om de wireline in de boorstang weg te kunnen laten en draadloos te kunnen boren. De wireline in de boorstang, waarmee de voeding voor de meetunit en de datatransmissie van de tool naar de boormachine wordt verzorgd moet bij magnetische en gyro systemen nog iedere boorstangen worden verlengd, en m.b.v. een krimpkous worden geïsoleerd om geen kortsluiting te krijgen. Deze wireline heeft als risico dat deze na verloop van tijd ook defect kan gaan tijdens het boren, met het gevolg dat de meetunit niet meer functioneert.

Enkele systemen welke al jaren worden onderzocht zijn het aanbrengen van een meetdraad geïntegreerd in de boorstangen, maar helaas is dit systeem na vele jaren ontwikkelen nog steeds niet operationeel voor HDD.

Een ander systeem is de datatransmissie door mudpulsen, waarbij enkel een zeer geringe hoeveelheid data kan worden verzonden, wat bij langere boringen ruim onvoldoende is om vlot te kunnen boren. Tevens moet de voeding van de meetunit nog worden verzorgd door een groot batterij pakket, of door een generator in de boorbuis welke stroom kan genereren bij het pompen van mud door de stangen. Ook dit systeem is nog niet geschikt gemaakt voor HDD.

Een ander mogelijk systeem is het EM transmissiesysteem waarbij door elektromagnetische signalen data kan worden verzonden. Dit systeem kan veel meer data versturen dan een

mudpuls systeem, maar wel aanzienlijk minder dan door een draad. Tevens is voeding door een batterij of mud generator nodig.

2.5 Nauwkeurigheid meetsystemen

De nauwkeurigheid van de meetsystemen wordt in verschillende documenten besproken:

- A. Nauwkeurigheid van boortechnieken voor de aanleg van kabels en leidingen - heden en verleden, NSTT, 2013.
- B. NEN 3650/ 3651 – 2020.
- C. Richtlijn Boortechnieken en open ontgraving voor kabels en leidingen, RWS, 2019.
- D. DCA document Accuracy of HDD.

Alhoewel een goede onderbouwing van de nauwkeurigheden ontbreekt, is uit de beschrijvingen in de documenten een nauwkeurigheid per meetsysteem af te leiden. De onderstaande tabel geeft per meetsysteem een samenvatting gegeven uit de documenten met betrekking tot de nauwkeurigheid.

Tabel 2.1 Nauwkeurigheden meetsystemen uit literatuuronderzoek.

Meetsysteem	Afwijking meetsysteem	Afwijking in boorproces ⁽¹⁾	Diepte meetbereik techniek in m	Verstoring door spanningskabels	Verstoring door stalen damwanden / KB bescherming
Walkover	2-5 % van diepte ⁽²⁾	Redelijk	10-15	Slecht	Slecht
Magnetisch - Trutrack ⁽⁴⁾ - Paratrack	1-2% van diepte	Redelijk	50 TT 75 PT	Redelijk	Slecht
Optische gyro	<0,1% van lengte ⁽³⁾	Goed	Onbeperkt	Goed	Goed

⁽¹⁾ Op basis van de meting tijdens de pilotboring (en rekening houden met de afwijking van het meetsysteem) wordt stuurinformatie verwerkt ten behoeve van de boormeester die leidt tot afwijking in boorproces.

⁽²⁾ Geen objectieve data beschikbaar, walk-over naar verwachting 10% van de diepte bij diepteligging groter dan 15 m.

⁽³⁾ voor as-built meting kan worden gevalideerd op de bekende begin- en eindpunt waarbij de onnauwkeurigheid van de as-built gemeten lijn sterk kan worden gereduceerd

⁽⁴⁾ Nauwelijks meer in NL toegepast.

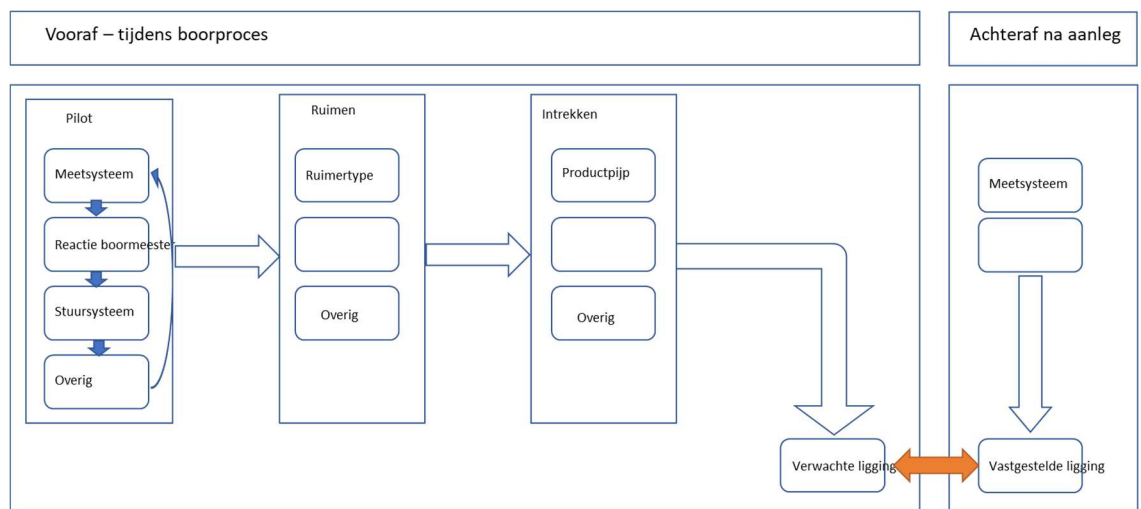
3 Afwijking door boorproces in de ondergrond

3.1 Algemeen

De afwijking van een gerealiseerde boorlijn ten opzichte van de designboorlijn hangt af van 2 factoren:

- Nauwkeurigheid van het meetsysteem.
- De afwijking die wordt veroorzaakt door het boorproces in de ondergrond.

Op basis van de informatie uit de pilotboring wordt een verwachting van de ligging van de productleiding(en) vastgesteld. Na meting van de uiteindelijke ligging van de leiding kan worden vastgesteld of de leiding ligging gelijk is aan de pilotboring boorlijn.



Figuur 3.1 Nauwkeurigheid met betrekking tot de ligging van de leiding.

Een bepaalde nauwkeurigheid wordt in de praktijk geëist. Er moet worden voldaan aan eisen voor de gerealiseerde boogstralen, of deze niet tot ontoelaatbare spanningen in het buismateriaal gaan leiden. Ook mag de leiding niet willekeurig op een andere plaats in de ondergrond worden gelegd en moet de kans op beschadiging van al aanwezige ondergrondse infrastructuur minimaal zijn.

Afwijkingen van de positie van de leiding mogen niet te groot zijn. Afwijkingen moeten beperkt blijven wegens:

- **Dwangpunten;** Het boor tracé heeft verboden punten zoals funderingspalen, andere leidingen of de bodem van een watergang. En verplichte punten zoals het begin- en eindpunt.
- **Intrekken;** De werkelijke boorlijn moet een vloeiend verloop hebben om de kabel of leiding soepel in te trekken.
- **Integriteit;** Bij het ontwerp van de boorlijn is rekening gehouden met de vorm die de leiding krijgt, een afwijking zoals een scherpere bocht beïnvloedt de spanningen in de leiding.

Nauwkeurig boren betekent dat de gerealiseerde leiding positie weinig afwijkt van de ontwerp boorlijn.

In dit hoofdstuk wordt beschreven:

- A. Wat zijn de gemeten afwijkingen van een aangelegde leiding?
- B. Wat veroorzaakt een afwijking in de boorlijn?

ad A. Database HDD-metingen

De metingen waarop de boormeester stuurt en andere meetdata worden opgeslagen. Voor dit project is deze data samen met de beschrijving van de boring opgeslagen in een database. Voor een aantal HDD's is de data opgezocht en opgeslagen. Deze data zijn verwerkt tot grafieken waarmee er duidelijk inzicht is in de nauwkeurigheid van de boring, de ligging van de boring en de gemeten gegevens

ad B. Mechanismen afwijkingen

Tijdens het boren kan de boorlijn sterk afwijken. De oorzaak van zo'n afwijking noemen we een mechanisme. Bij een afwijking is een terugkeer naar de ontwerp boorlijn mogelijk door bij te sturen, ook dit "bijstuur" mechanisme is onderzocht.

3.2 Database HDD-metingen en verwerking

3.2.1 Aangeleverde informatie HDD's

Aannemers hebben gegevens aangeleverd van door hen uitgevoerde HDD-boringen in een invoer spreadsheet. De aannemers hebben dit invulblad voor de 10 HDD projecten ingevuld met de boorlijn coördinaten. Er zijn 4 series coördinaten gevraagd (zie Tabel 3.1):

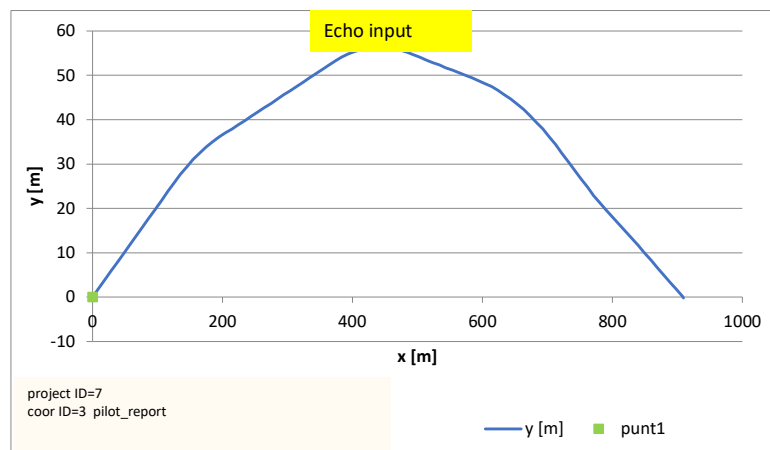
Tabel 3.1 Boorlijn coördinaten.

Boorlijn coördinaten
1. Ontwerp boorlijn (pilot design)
2. Meting pilot boorlijn ruwe data (pilot measured)
3. Gemeten pilot boorlijn zoals gerapporteerd, (pilot report)
4. Meting eind (pipeline installed)

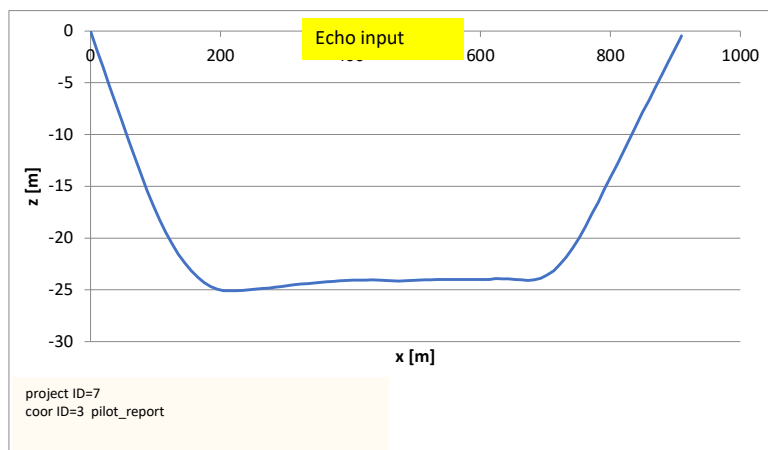
De coördinaten van de boorlijn zijn door de aannemers ingevoerd als 3D (x, y, z) coördinaten.

3.2.1.1 Weergave van de invoer

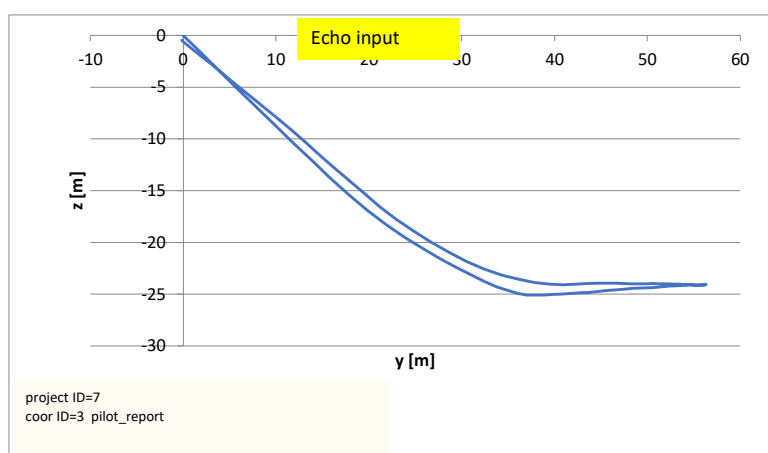
De eerste stap in de verwerking is om de coördinaten als drie 2D figuren weer te geven. Voor één project zijn deze figuren als voorbeeld hieronder weergegeven:



Figuur 3.2 Weergave lijn pilot report in xy vlak.



Figuur 3.3 Weergave lijn pilot report in xz vlak.



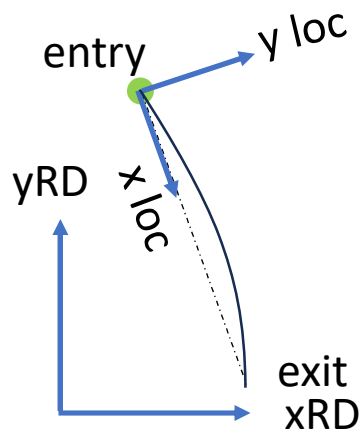
Figuur 3.4 Weergave lijn pilot report in yz vlak.

3.2.1.2 Offset correcties

Bij de verwerking van de data bleek dat er soms een offset aanwezig te zijn. Dat werd zichtbaar als de 4 coördinaat series in één figuur werden weergegeven. Daarom in de mogelijkheid ingebouwd om een verschuiving van de eerste en de laatste coördinaat op te geven. De tussenliggende coördinaten worden dan naar rato verschoven.

3.2.1.3 Transformatie naar lokaal assenstelsel

Een lokaal assenstelsel met de oorsprong in het entry punt zorgt dat de getallen van de coördinaten veel kleiner zijn dan de RD-coördinaten. Van honderdduizenden meters neemt dit af tot honderden meters. Als de x_{lokaal} -as wordt gekozen van het entry punt naar het exit punt kan bovendien worden volstaan met 2 figuren: XY en XZ. Deze assenstelsels van een bovenaanzicht zijn weergegeven in Figuur 3.5.



Figuur 3.5 Weergave globaal en lokaal assenstelsel.

3.2.1.4 Gemeten parameters

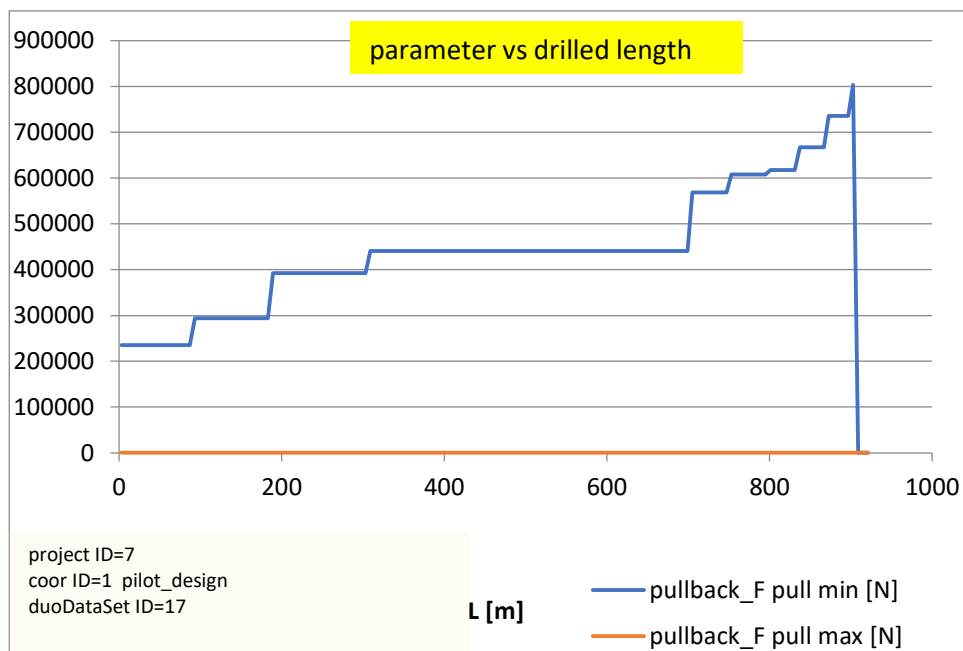
Aan de aannemers is ook gevraagd om de gemeten parameters tijdens het boren in te voeren. De parameters die zijn opgevraagd zijn opgenomen in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Opgevraagde parameters.

Opgevraagde parameters; steeds minimale en maximale waarde

1. pilot_P pump min [bar]
2. pilot_P min gauge 1 [bar]
3. pilot_Q flow min [l/min]
4. pilot_T torque min [Nm]
5. pilot_RPM min [-]
6. pilot_unit weight mud in [g/l]
7. pilot_F thrust min [N]
8. reamer1_P pump min [bar]
9. reamer1_T torque min [Nm]
10. reamer1_Q flow min [l/min]
11. reamer1_RPM min [-]
12. reamer1_F pull min [N]
13. pullback_P pump min [bar]
14. pullback_T torque min [Nm]
15. pullback_Q flow min [l/min]
16. pullback_RPM min [-]
17. pullback_F pull min [N]

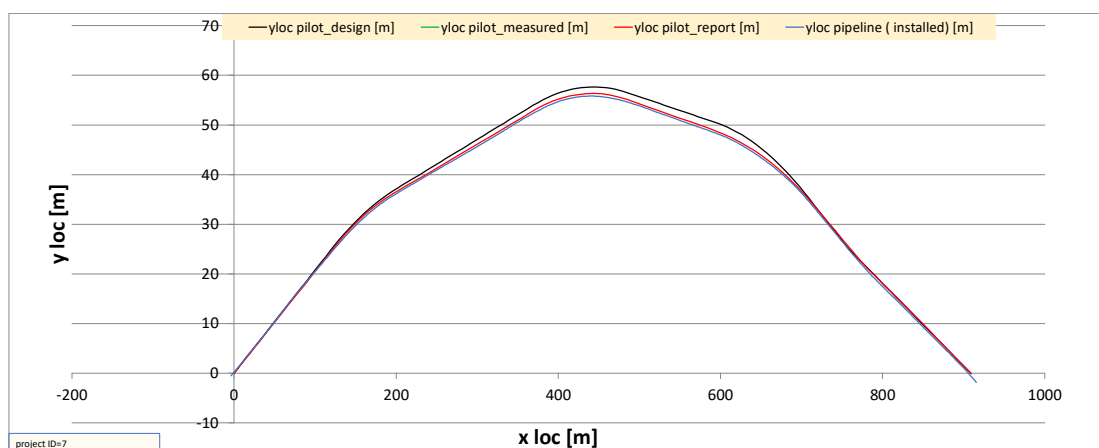
Voor een project is de intrekkracht Fpullback weergegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Grootte intrekkracht $F_{pullback}$ min tegen de lengte van de leiding ($F_{pullback}$ max is niet opgegeven in dit voorbeeld).

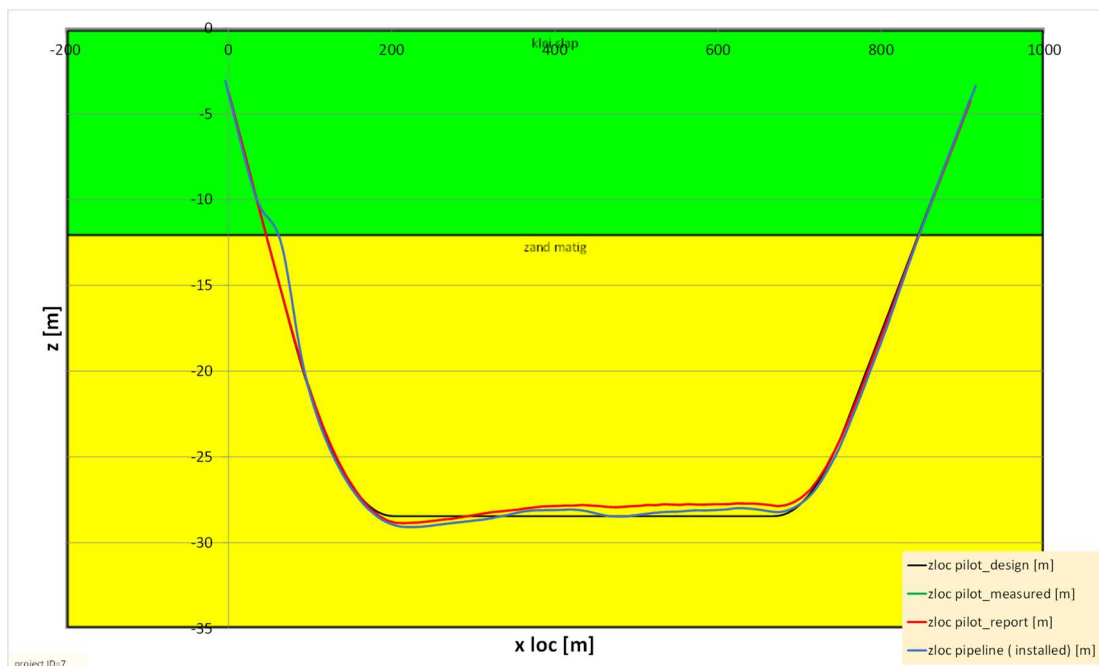
3.2.1.5 Weergave boorlijnen in lokaal assenstelsel

In Figuur 3.7 is het bovenaanzicht weergegeven en in Figuur 3.8 het zijaanzicht. De kleuren van de boorlijnen komen overeen met de kleuren in Tabel 3.1 Boorlijn coördinaten.



Figuur 3.7 Boorlijnen in bovenaanzicht uitgezet in lokaal assenstelsel.

In bovenstaande Figuur 3.7 is te zien dat ten opzichte van de zwarte ontwerplijn de rode pilot lijn in de binnenbocht gelegen is. Vervolgens wordt het boorgat geruimd en de leiding ingetrokken. De inmeting van de ingetrokken leiding is de blauwe lijn. Deze lijn is in de binnenbocht gelegen.



Figuur 3.8 Boorlijnen in zijaanzicht uitgezet in lokaal assenstelsel samen met de grondopbouw.

In bovenstaande Figuur 3.8 is te zien dat de ten opzichte van de zwarte ontwerplijn de rode pilot lijn lijkt door te schieten bij de eerste bocht. Vervolgens komt de pilotboring over het horizontale deel te hoog te liggen. Na de tweede bocht lijkt de pilotboring weer goed op de ontwerplijn te liggen.

Na ruimen en intrekken geeft de blauwe lijn de ligging van de leiding. Nabij het intredepunt lijkt het of bij het ruimen of intrekken de laagscheiding tussen de groene slappe klei en het gele zand een rol heeft gespeeld. Ook lijkt de ligging van de leiding (blauwe lijn) in het horizontale deel van de boorlijn een slingerend verloop te hebben.

3.2.1.6 Weergave boorlijnen HDD's met coördinaat langs de ontwerplijn

Een bezwaar tegen de voorgaande Figuur 3.7 en Figuur 3.8 is dat het eigenlijk onduidelijk is hoe groot de afwijking van de uitvoeringsboorlijnen (groen/rood/blauw) is ten opzichte van de ontwerplijn (zwart). Daarom is een assenstelsel langs de as van de ontwerp boorlijn gekozen. De x-as van het assenstelsel is in de richting van de ontwerplijn. De x-coördinaat x_{des} is dus de geboorde lengte. De z_{des} -as staat loodrecht op de designline is zoveel mogelijk in de globale z-richting, ofwel in de positieve z-richting. De wiskundige definitie is dat de z_{des} richting de projectie van de $z_{glob}=z_{loc}$ vector op het vlak loodrecht op de x_{des} richting is. Verschuiving van deze vector naar de ontwerplijn geeft de z_{des} richting met het nulpunt. De y_{des} richting staat loodrecht op de x_{des} en loodrecht op de z_{des} richting. De richting kan twee kanten op zijn. De correcte richting geeft een rechtsdraaiend (x_{des} , y_{des} , z_{des}) assenstelsel.

Vanuit het gezichtspunt van de boormeester geldt nu (zie Figuur 3.9):

y_{des} richting is 9 uur.

z_{des} richting is 12 uur.

Figuur 3.9 Overeenkomst boorlijn langs as ontwerplijn en het dashboard van de boormeester.

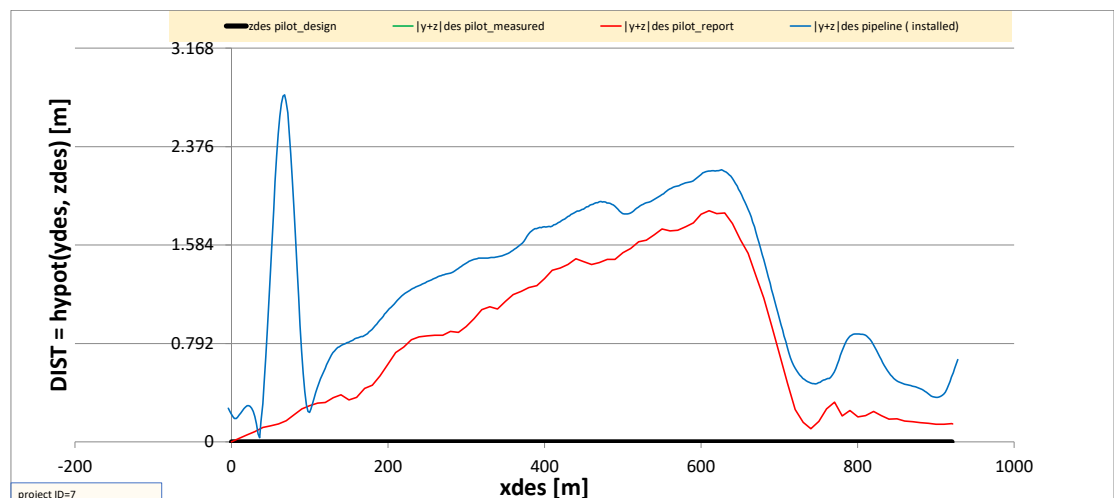
De ydes coördinaat is weergegeven in Figuur 3.10 en de zdes coördinaat in Figuur 3.11.

Figuur 3.10 Weergave y_{des} coördinaat tegen x_{des} coördinaat.

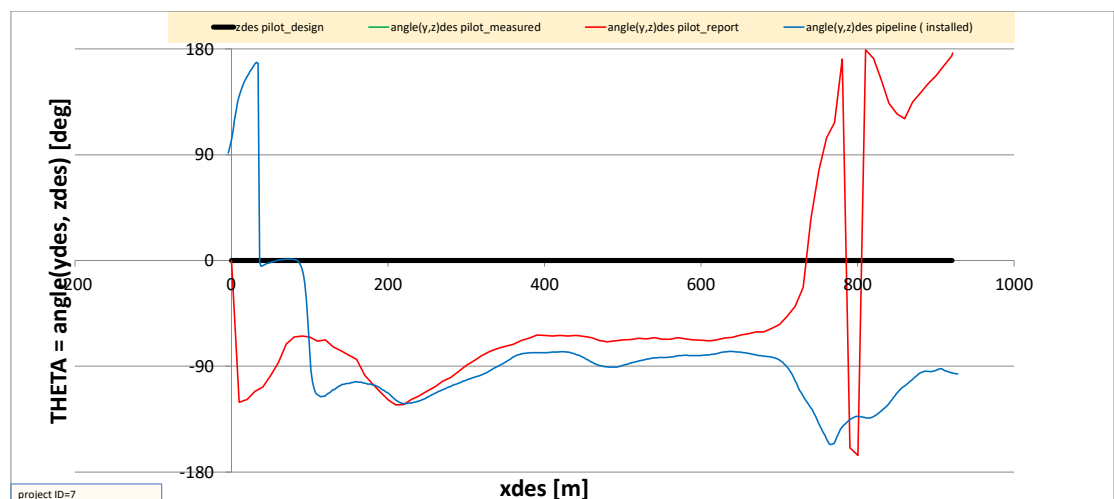
Figuur 3.11 Weergave z_{des} coördinaat tegen x_{des} coördinaat.

Figuur 3.10 en Figuur 3.11 geven een veel duidelijker beeld van de grootte van de afwijking. In het gebied tussen $x_{des} = 400$ m en $x_{des} = 700$ m is juist de horizontale y afwijking dominant met een waarde rond de 1,5 m. Bij de laagovergang op $x_{des} = 70$ m is de verticale afwijking dominant met een maximale afwijking van 2,7 m.

Een alternatieve weergave is de weergave van de grootte van de afwijking en de richting van de afwijking. Eigenlijk is dit een cilindercoördinaat. Da afwijking is weergegeven als DISTANCE. De richting is weergegeven met THETA in graden.



Figuur 3.12 Weergave DISTANCE tegen x_{des} coördinaat.



Figuur 3.13 Weergave THETA in graden tegen x_{des} coördinaat.

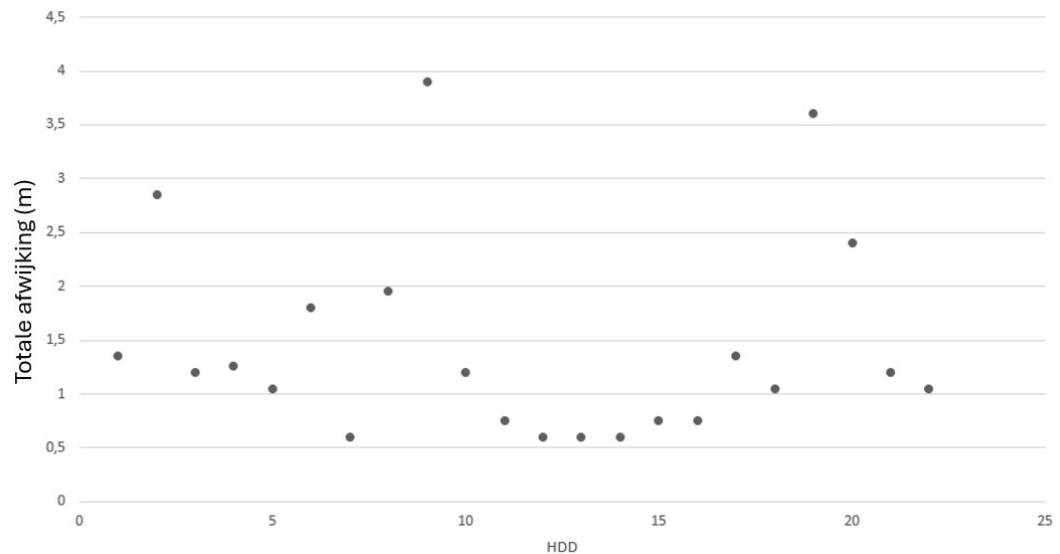
In Figuur 3.12 is eenvoudig te zien dat de grootste afwijking ontstaat bij de ingetrokken leiding. Bij een afstand van $x_{des} = 70$ m is de afwijking 2,7 m. Daarna volgt een tweede top in de afwijking bij $x_{des} = 630$ m met een afwijking van DIST = 2,2 m.

3.2.1.7 Statistische bewerking van de coördinaat series

De gecombineerde afwijkingen van de pilotboorlijn en de pijpleiding positie na installatie ten opzichte van de ontwerpboorlijn werden bepaald en de standaarddeviatie van de gecombineerde afwijkingen is berekend. De maximale waarden uit de metingen (pilot en leiding positie) zijn verder verwerkt

De maximale afwijking uit de metingen kan worden berekend met behulp van de standaarddeviatie. De maximale optredende afwijking is ongeveer 3 keer de standaarddeviatie (99%).

Deze 99%-waarde werd berekend voor alle horizontale gestuurde boringen in de database met complete gegevens. De resultaten van de 99%-waarden worden in de onderstaande afbeelding weergegeven als totale afwijkingen.



Figuur 3.14 Totale afwijking van horizontaal gestuurde boringen (99%).

3.2.2 Conclusie

In Nederland is in het gebied met sedimentaire bodems een afwijkingsanalyse gedaan op uitgevoerde HDD-projecten. De analyse werd mogelijk gemaakt door de beschikbaarheid van meetgegevens van 25 horizontaal gestuurde boringen in een database. De analyseresultaten laten zien dat de totale afwijking voor het merendeel van de horizontaal gestuurde boringen in de sedimentaire bodems in Nederland kleiner is dan 1,5 m. Twee horizontaal gestuurde boringen in de database laten een grotere afwijking zien van meer dan 3 m.

3.3 Afwijkingen door boorproces en ondergrond

3.3.1 Algemeen

De oorzaak voor de gemeten afwijkingen uit de vorige paragraaf wordt bepaald door optredende mechanismen. De belangrijkste mechanismen die de afwijkingen veroorzaken zijn vastgesteld in verschillende sessies met diverse specialisten:

- A Veranderingen in bodemeigenschappen door overgangen van grondlagen.
- B Opdrijven en zinken door het gewicht van de downhole tools en de leiding in de boorgaten.
- C Insnijden in de bochten door de bocht reactie tijdens uitoefenen van een trekkracht.
- D Bocht werking door de interactie van de boorkop en de stijfheid van de boorstreng.
- E Insluitingen en objecten in de ondergrond.
- Z De stuurreactie van de boormeester op de waargenomen afwijkingen tijdens het boren.

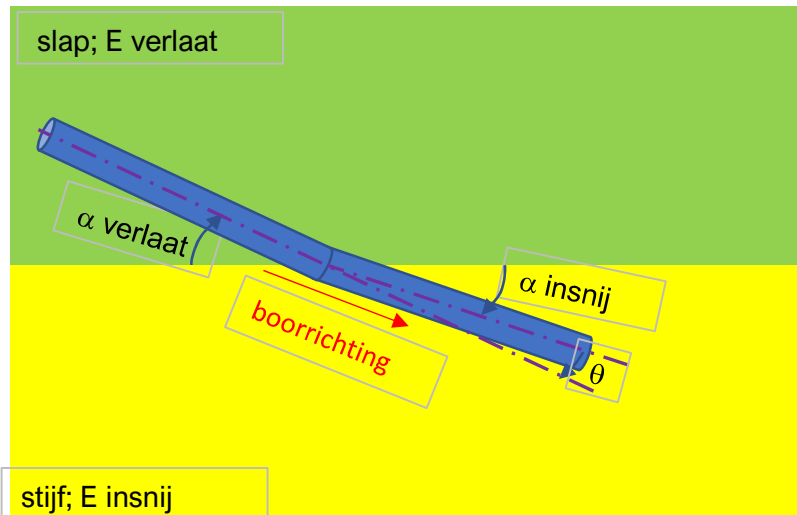
Met letters wordt gerefereerd naar de bovenstaande mechanismen. Het laatste mechanisme heeft de letter Z. Dit laatste mechanisme is eigenlijk geen mechanisme dat een afwijking veroorzaakt. Mechanisme Z is het sturen van de boormeester. Het model voor het gedrag van de boormeester kan worden omschreven als een 'digital twin'.

3.3.2 Mechanisme A Laagovergang; Pilot schuin doorsnijden laagscheiding

Deze paragraaf beschrijft een model voor de hoekverandering van de boorlijn na de overgang van een slappe naar een stijve grondlaag.

3.3.2.1 Bouwstenen model

Bij het aansnijden van de stijvere laag moeten de reactiekrachten komen uit de slappere lagen. Essentieel is hoe de boorkop boort in de grondlaag en hoe de nozzles de grond losspoelen. Het model heeft als onbekende de hoekverandering θ bij het boren door de overgang van een slappe naar een stijve laag. Schematisch is dit weergegeven in de onderstaande Figuur 3.15.



Figuur 3.15 Relevante parameters bij boren door laagovergang.

Het model mechanisme laagovergang gebruikt 3 bijdragen voor de bepaling van grootte van de hoekverandering θ .

3.3.2.2 Bijdrage 1; stijfheidsverhouding grondlagen

Zonder berekening is evident dat hoe groter het stijfheids- en sterkteverschil tussen de lagen is hoe groter de afwijking zal zijn. De sterkte en stijfheid van grond correleren sterk. Daarom is het voor de modellering van de grind voldoende om of een sterkte- of een stijfheidsparameter te gebruiken. In dit rapport is gekozen om hiervoor de stijfheidsparameter “elasticiteitsmodulus” E aan te houden. De motivatie voor deze keuze is dat de E waarde een algemeen bekende (niet specifiek geotechnisch) parameter is en dat er eenvoudige correlaties bestaan met de conusweerstand uit sonderingen.

Als relevante parameter is het quotiënt van de stijfheden gebruikt: $E_{\text{insnij}}/E_{\text{verlaat}}$. Een grotere hoek θ zal optreden bij een grotere waarde van dit quotiënt.

3.3.2.3 Bijdrage 2; boorhoek α_{verlaat}

Randvoorwaarden:

- Hoe flauwer de helling tussen boring en laagovergang (α_{verlaat}), hoe groter de afbuiging θ .
- Bij een hele flauwe hoek zal de boring afglijden langs de overgang, dus $\theta = \alpha_{\text{verlaat}}$.
- Als de boring haaks staat op de laagscheiding (dus verticale boring) is er geen afbuiging. ($\alpha_{\text{verlaat}} = 90^\circ \rightarrow \theta = 0^\circ$).

De genormaliseerde boorhoek α_{verlaat} heeft een waarde tussen 0 en 1.

3.3.2.4 Bijdrage 3; referentiehoek $\theta_{\max}$

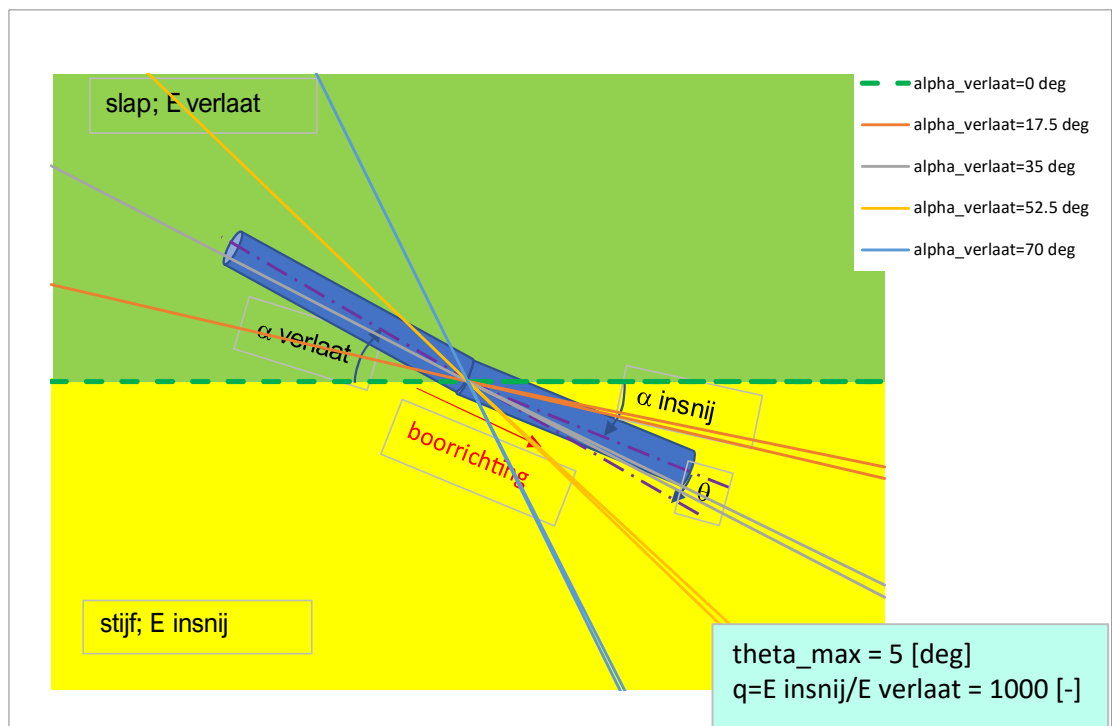
De referentie hoek $\theta_{\max}$ is de maximale afbuiging als vanuit een extreem slappe laag (veen) in een extreem stijve laag (vastgepakt zand) wordt geboord. Pas bij een wat grotere hoek α_{verlaat} zal de boorkop kunnen “happen” in de stijve laag. Bij een flauwe hoek α_{verlaat} zal de boorkop langs de stijve laag glijden. De grootte van de hoek waarbij de boorkop nog net hapt geeft de grootste afwijking θ en dicteert dus de waarde $\theta_{\max}$. Als er wel slappe grond wordt verwacht wordt het materiaal aangepast, bijvoorbeeld met een stuurschoen. Dan zal de hoek $\theta_{\max}$ veel kleiner zijn.

3.3.2.5 Compleet model mechanisme A

Het complete model op basis van de voorgaande bijdragen is:

$$\alpha_{\text{insnij}} = \max(0, \alpha_{\text{verlaat}} - \theta_{\max} * \text{fact1} * \text{fact2})$$

Als voorbeeld is hieronder in Figuur 3.16 een grafisch uitwerking gegeven voor $\theta_{\max} = 5^\circ$.



Figuur 3.16 Voorbeeld uitwerking model voor mechanisme A laagscheiding.

3.3.3 Mechanisme B; Zinken & Oprijven

Deze paragraaf beschrijft een model voor de bocht die de boorkop maakt door de opdrijvende of zinkende kracht van de Bottom Hole Assembly (BHA) in de boorvloeistof.

3.3.3.1 Relevantie voor BHA, ruimer en leiding

Bij een HDD-boring wordt boorvloeistof gebruikt om het boorgat open te houden. Het boormaterieel zal zwaarder of lichter dan de boorvloeistof zijn. Het boormaterieel zoals de BHA, ruimer of leiding zal dus de neiging hebben om op te drijven of om te zinken. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de grootte van de verhouding tussen de opdrijfkracht in de boorvloeistof en de massa van het boormaterieel.

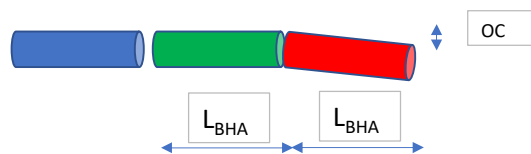
3.3.3.2 Bocht door boorkop

Door zinken of drijven heeft de boorkop een continue neiging om van richting te veranderen. Een constante verandering van de richting geeft een bocht. De paragrafen hierna beschrijven de bijdragen aan de grootte van deze bocht.

3.3.3.3 Bijdrage uit overcut (OC)

Door de overcut “hangt” het net geboorde deel van de Bottom Hole Assembly (BHA) vrij. Stabiliteit wordt verkregen door het eerder geboorde deel waar de BHA zijn reactiekracht aan ontleent. De buigstijfheid van verbinding tussen de boorstangen en de BHA is verwaarloosd. Als model wordt aangehouden dat de BHA per lengte ($=L_{BHA}$) een stijging (of zakking) gelijk aan de overcut (annular thickness=overcut) krijgt. De grootte van de opdrijfkracht speelt hier nauwelijks een rol, alleen het teken van de opdrijfkracht:

- Positieve opdrijfkracht → positieve z-richting → opdrijven.
- Negatieve opdrijfkracht → negatieve z-richting → zinken).

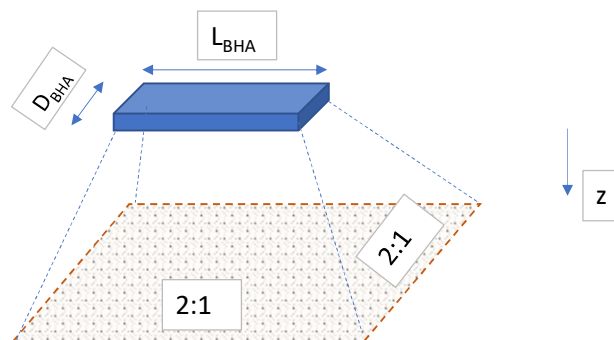


Figuur 3.17 Zakking Bottom Hole Assembly door OverCut (OC).

Hiermee is de kromming te berekenen en de richting van de kromming wordt gedefinieerd met het teken van de opdrijfkracht.

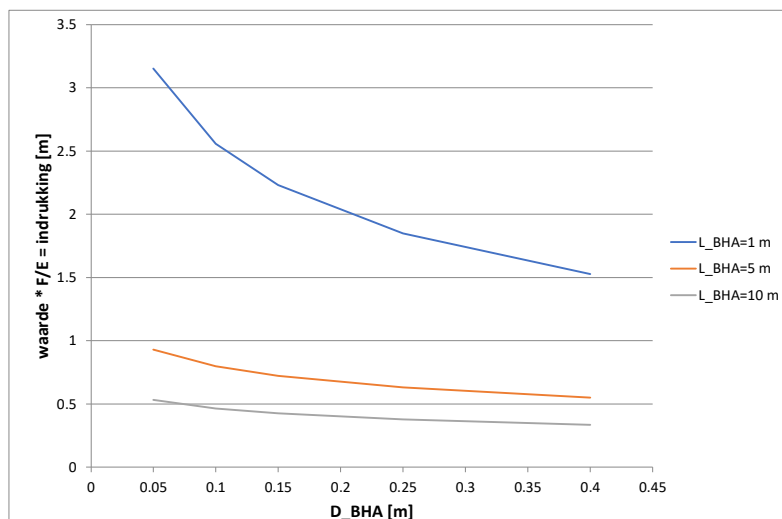
3.3.3.4 Grond samendrukking

Een extra verplaatsing van de boorkop ontstaat door de flexibiliteit van de ondergrond, dit speelt vooral een rol bij flexibele grondsoorten, dus slappe klei- en veengronden. De aandrijvende kracht voor de samendrukking is de reactiekracht op de BHA. Vanuit de BHA “voetafdruk” is een spanningsspreiding onder een hoek 2:1 aangehouden (dit is een gangbare hoek bij verticale spanningsspreiding). Dit is getekend in de onderstaande Figuur 3.18.



Figuur 3.18 Berekeningsmodel zakking Bottom Assembly Hole door samendrukking grond.

De indrukking is nu te berekenen als de integraal van de rek van diepte 0 tot oneindig. Het verloop van de grootte van de indrukking is grafisch weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 3.19 Indrukking BHA door samendrukking grond.

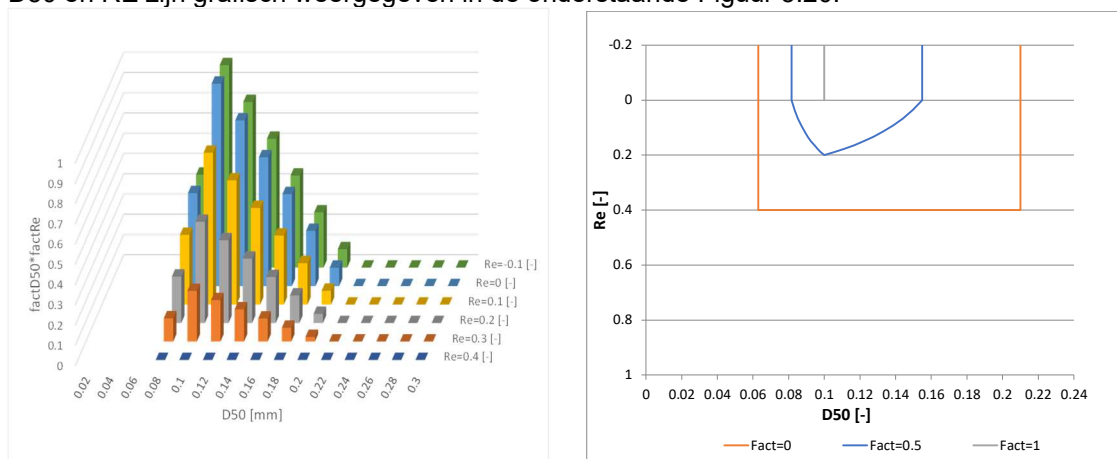
3.3.3.5 Bijdrage uit uitspoeling van grond

Als een grondsoort een korrelig materiaal is wordt dit granulaire grond genoemd. In Nederland is dat zand of grind. Bij granulaire grond kan vervorming door uitspoeling/verweking/lopen van de grond optreden. Deze vervorming zal niet optreden bij grover materiaal zoals grind of grof zand, maar wel bij fijn zand. Relevante grondparameters zijn:

- cu : De parameter cu beschrijft de uniformiteit ($cu=D_{60}/D_{10}$) van de granulaire grond. Voornamelijk is het onduidelijk of een hoge of lage uniformiteit potentieel een grotere uitspoeling geeft, daarom vervalt deze parameter voor het model.
- D_{50} : De parameter D_{50} is maat voor de grofheid van granulair materiaal. De ervaring is dat alleen fijn zand de neiging heeft om te gaan "lopen". Een korrelgrootte onder de 0,210 mm wordt geclassificeerd als matig fijn zand. Hier wordt verondersteld dat bij $D_{50} > 0,210$ mm geen lopen van zand kan optreden.
- R_e : De parameter R_e (relatieve dichtheid) is een maat voor de pakkingsdichtheid van zand. In principe ligt de waarde van R_e tussen 0% en 100. Hier wordt verondersteld dat alleen los gepakt zand de neiging kan hebben om te gaan lopen. De bovengrens wordt aangehouden op:

$$R_e \leq 40 [\%]$$

D_{50} en R_e zijn grafisch weergegeven in de onderstaande Figuur 3.20.



Figuur 3.20 Genormeerde invloed van grondparameter D_{50} (links) en grondparameter R_e (rechts).

De diameter van de BHA is gekozen als maximale waarde voor de grootte van de uitspoeling. Daarmee is de grootte van de uitspoeling gelijk aan het product van de diameter van de BHA en de genormeerde waarde uit bovenstaande Figuur 3.20.

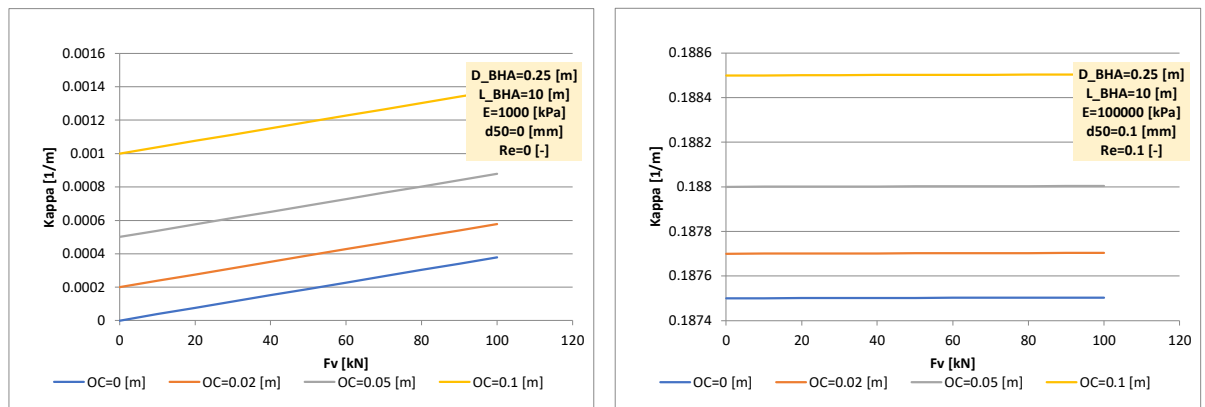
3.3.3.6 Compleet model mechanisme B

In de voorgaande drie paragrafen zijn drie bijdragen aan de verplaatsing bepaald:

- Bijdrage uit overcut (OC).
- Bijdrage uit samendrukking van de grond.
- Bijdrage uit uitspoeling van de grond.

De sommatie van deze bijdragen is mogelijk, omdat deze elkaar onderling niet beïnvloeden. Voor de kracht $F_{BHA; buoy}$ moet de absolute waarde gebruikt worden.

Voor een klei en zand ondergrond staan voorbeelden van het berekeningsresultaat in de onderstaande Figuur 3.21.



Figuur 3.21 Voorbeeld berekening kromming bij klei (links) en zand (rechts).

3.3.4 Mechanisme C; Insnijden bochten

Deze paragraaf geeft een model voor de diepte van insnijding van de boorstangen in de binnenbocht bij intrekken.

3.3.4.1 Motivatie modellering

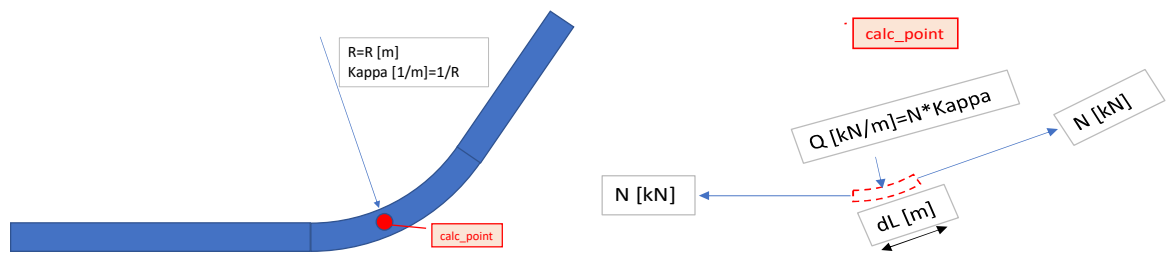
De modellering is gedaan op basis van de informatie van de aannemers. Bij de pilot boring zal insnijden niet optreden. Bij de pilot staat er druk op de boorstangen, zodat deze niet langs de binnenbocht zullen schuren. Bij de fases ruimen en intrekken treedt “insnijden van bochten” wel op.

3.3.4.2 Model in bocht zelf

De boorstang draagt een trekkracht over. De trekkracht bestaat uit:

- **Ruimen**
De kracht nodig om:
 - De ruimer door de grond te trekken.
 - De boorstang door de boorgang te trekken.
- **Intrekken**
De kracht nodig om:
 - De leiding met ruimer of trekkop in te trekken.
 - De boorstang door de boorgang te trekken.

Ter vereenvoudiging wordt een gemiddelde trekkracht (N) gebruikt om zowel de ruimer/leiding als de boorstang voort te trekken. In een bocht ontstaat het onderstaande krachterevenwicht in Figuur 3.22.



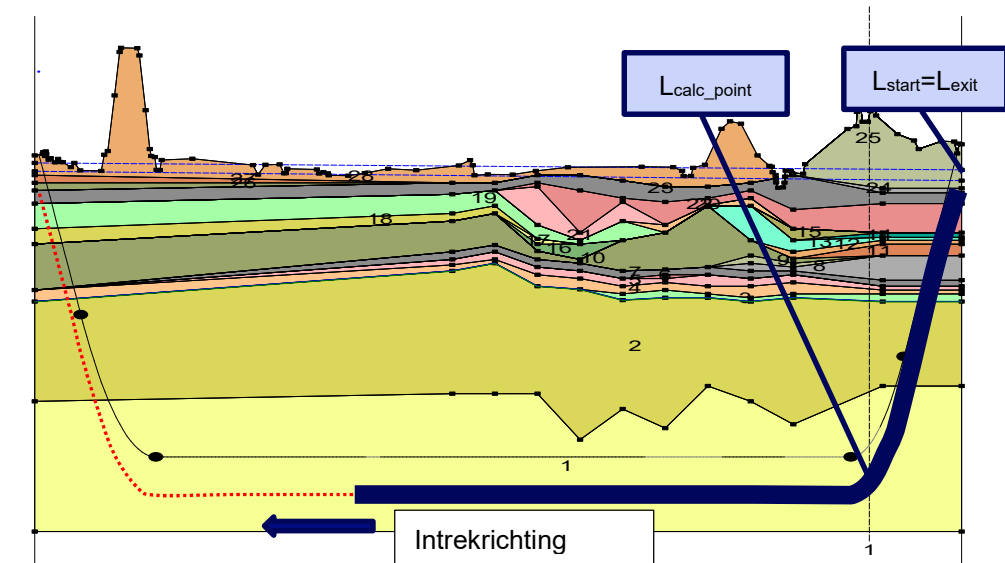
Figuur 3.22 Krachten bij ruimen of intrekken leiding.

De kleine diameter boorstangen geven de insnijding. Om de ruimer of leidingkop door de grond te trekken is een grote kracht nodig. De boorstangen voor de ruimer of leidingkop hebben dus een grote trekkracht, de stangen achter de ruimer of leidingkop niet. Na de passage van de ruimer/leidingkop stopt de insnijding.

De lengte waarover de insnijding zal optreden is dus de afstand waarover de boorstangen langs het beschouwde punt schrapen. Dit is de afstand tussen het beschouwde punt ($L_{\text{calc_point}}$) en het trekpunt (L_{start}).

Daarom is voor het modelleren van insnijden de werkrichting relevant (zie Figuur 3.23):

- Intrekrichting exit -> entry punt $L_{\text{start}} = L_{\text{exit}}$.
- Intrekrichting entry -> exit punt $L_{\text{start}} = L_{\text{entry}}$.



Figuur 3.23 Voorbeeld ontwerprijn (met alleen verticale) bochten.

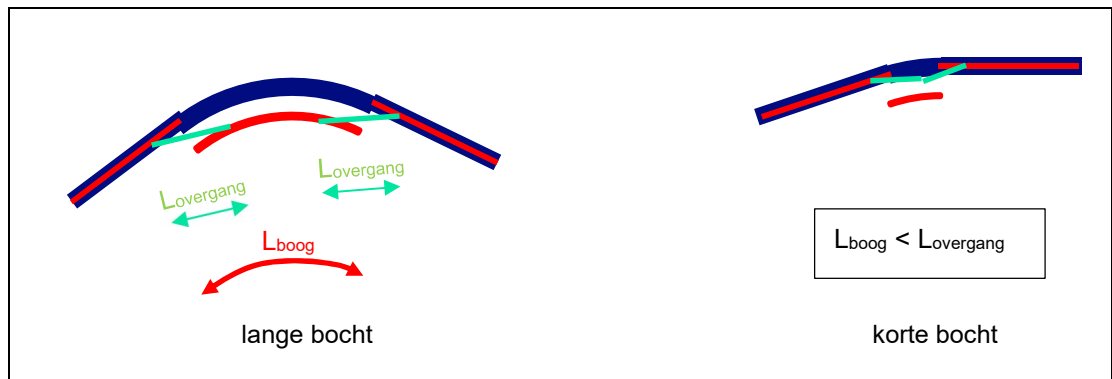
W_{insnij} is een maat voor de insnijding in de grond. Het is handig om in deze parameter ook de diameter van de boorstang op te nemen. Er is dan één parameter ($W_{\text{insnij streng}}$) die de insnijding bepaalt.

3.3.4.3 Rand van model; overgang bocht naar recht

Deze paragraaf beschrijft de geleidelijke overgang van de insnijding tussen een bocht en een rechte. Figuur 3.24 geeft een voorbeeld van een berekeningsresultaat. Uiteraard is de sprongvormige overgang fysisch onmogelijk. Een eenvoudige continue overgang is gemaakt met een rechte lijn. De lengte van de overgangszone is gelijk gekozen aan:

$$L_{\text{overgang}} = 100 * w_{\text{insnij streng}}$$

In de praktijk geeft dit een aansluiting vanuit het rechte deel met een hoek 1:100 op het gebogen deel. In Figuur 3.24 is dit te zien.



Figuur 3.24 Schematische berekeningsvoorbeelden met in groen de randoplossing.

De overgang is symmetrisch gekozen. Vooralsnog lijkt er geen reden om te kiezen voor een verschil tussen de voor- en achterkant van een bocht.

3.3.5 Mechanisme D; Pilot minimale boogstraal

Hieronder de beschrijving van een model voor de minimale boogstraal van de pilot boring. Met een minimale boogstraal die groter is dan de ontwerpboogstraal kan de boring de bocht niet maken, de boorkop loopt dan uit de bocht.

3.3.5.1 Methode om bocht te maken bij pilot boring

Met de boorbit in een vaste positie wordt een gat geboord met een constante boogstraal. De combinatie van de ondergrond met het type boorbit en verdere BHA geeft een minimaal te boren boogstraal.

3.3.5.2 Minimale boogstraal

parameters die van belang zijn voor dit mechanisme zijn:

- A. Type drillbit/stuurschoen + BHA.
- B. Buigstijfheid boorstreng.
- C. Ondergrond (cohesief: elasticiteitsmodulus E, granulair: korrelgrootte D_{50} en relatieve dichtheid Re).

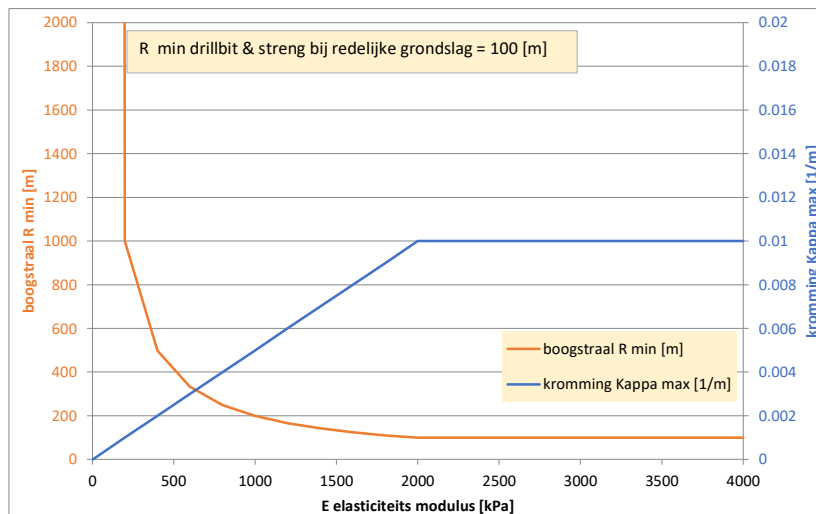
Boormaterieel item A en B

Vooralsnog is het redelijk om aan te nemen dat de combinatie drillbit & buigstijfheid boorstreng zich laten vangen in een minimale boogstraal ($R_{\min}$) die realiseerbaar is bij een slappe grondslag. Daarmee zijn A en B uit de opsomming verwerkt.

Grondslag cohesief item C

Bij een slappere grondslag is de minimale boogstraal is groter. Voor cohesieve grond is de daarvoor de elasticiteitsmodulus als parameter gekozen.

Als model is aangehouden dat de minimale Boogstraal $R_{\min}$ bekend is bij een slappe grondslag, waarbij slap bijvoorbeeld overeenkomt met $E=2000$ kPa. Dit is een waarde voor slappe klei. Voor slap veen is de stijfheid eerder gelegen in de range $E = 500-1000$ kPa. Dit is weergegeven in Figuur 3.25.



Figuur 3.25 Grafische weergave minimale boorstraal tegen de elasticiteitsmodulus van cohesief materiaal.

Grondslag granulair; item C

Voor granulair materiaal wordt de aanpak van Paragraaf 3.3.3.5 aangehouden.

Een voorbeeld van de uitwerking voor granulair materiaal (hier zand) staat hieronder in Figuur 3.26.

Re	0.1 [-]
D50	0.1 [mm]
Rmin; ref	100 [m]
factRe	0.75 [-]
factD50	1 [-]
fact	0.75 [-]
Rmin	400 [m]

Figuur 3.26 Numerieke uitwerking minimale boorstraal voor granulair materiaal.

3.3.5.3 Voorbeeld minimale boogstraal > ontwerp boogstraal

Een scherpe bocht boren is niet mogelijk als:

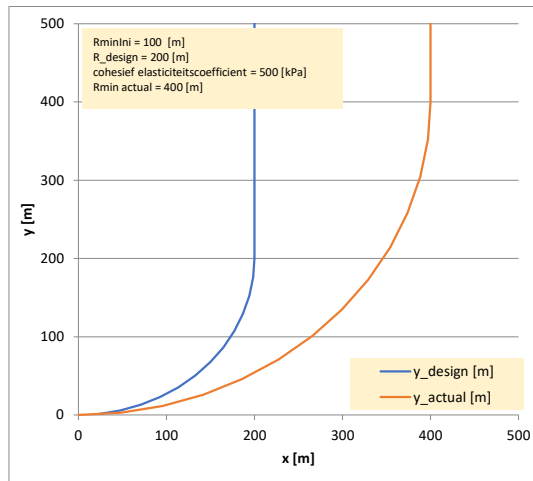
- Het materieel niet geschikt is.
- De ondergrond niet geschikt is.

In de voorgaande paragraaf is een model voor de minimaal te boren boogstraal beschreven. Met een minimale boogstraal die groter is dan de ontwerpboogstraal kan de boring de bocht niet maken, de boorkop loopt uit de bocht. In Figuur 3.27 is de modellering van dit gedrag weergegeven voor een slappe grondlaag met $E = 500$ kPa. Voor het materieel (boorbit, BHA) is de modellering uit Figuur 3.25 gebruikt, dus met een waarde $R_{\min}$ initieel = 100 m.

Een voorbeeld van een boring:

- Ontwerplijn met een haakse bocht met boogstraal 200 m in het horizontale vlak.
- Boorbit, BHA en boorstreng met initiële minimale boogstraal van 100 m.
- Slappe grond met elasticiteitsmodulus $E = 500$ kPa.

De grafische uitwerking van het voorbeeld staat hieronder in Figuur 3.27.



Figuur 3.27 Grafische voorbeeld minimale boorstraal > ontwerpboorstraal.

Duidelijk te zien is dat de afwijking heel groot is. Dit komt door de haakse bocht. Een bocht van bijvoorbeeld 15° is realistischer.

3.3.6 Mechanisme E; Insluitingen in ondergrond

Deze paragraaf geeft een model voor het raken van grote keien of andere insluitingen in de grond bij een pilot boring.

3.3.6.1 Modelleren

Het model beschrijft de essentiële aspecten voor het raken van keien in de ondergrond zo eenvoudig mogelijk.

De volgende aspecten zijn essentieel in het model:

- **Kei §3.3.6.2**
Een grote kei is niet weg te drukken, de boring zal afketsen.
- **Boorstreng en boorgang §3.3.6.3**
De doorboorde grond ondersteunt de boorstreng en de BHA. De boorstreng kan alleen afketsen door:
 - Een verbuiging van de streng en BHA.
 - Het dicht drukken van de overcut.
 - Het indrukken van de boorgatwand.
- **Interactie kei en boorstreng §3.3.6.4**
Het raken van een kei zorgt voor een afwijking van de boring op het punt waar de boring en de kei elkaar raken.
- **Bijsturen na botsing §3.3.6.5**
Na de botsing komt de boorkop vrij van de kei. De boormeester stuurt bij om weer op de ontwerp boorlijn te komen.
- **Statistiek §3.3.6.6**
De kans op het raken van een grote kei is klein. Als die kans groot zou zijn, dan wordt er een andere aanlegmethode gekozen of een boorkop die geschikt is voor het boren in rotsgrond. Het is mogelijk dat meerdere keien geraakt worden. Er kunnen dus ook meerdere keien geraakt worden. Dit maakt dat een minimale statistische aanpak onvermijdelijk is.

3.3.6.2 Kei

Een onvervormbare bol staat model voor een kei. De diameter (D_{boulder}) van de bol/kei is de invoerparameter. In §3.3.6.6 wordt de kans van voorkomen per diameterklasse beschreven.

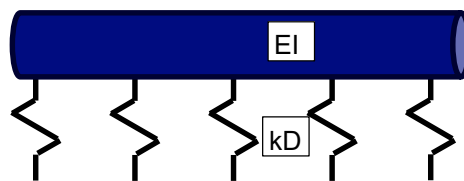
3.3.6.3 Boorstreng en boorgang

Stijfheid boorstreng

De boorstreng bestaat uit boorbuizen en een BHA. Het boorstreng model is een buigligger met een constante buigstijfheid EI . In werkelijkheid is de BHA veel stijver dan de boorbuizen. De modelering is daarmee conservatief.

Stijfheid boorwand

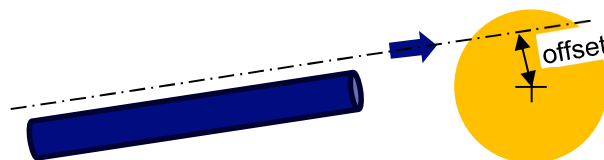
De boorgang kan worden ingedrukt. Schleicher geeft een model om de combinatie van de elasticiteitsmodulus (E) van de ondergrond in combinatie met de buigstijfheid (EI) van de boorstreng om te rekenen naar een beddingsconstante voor een "Winkler beam" model (Figuur 3.28).



Figuur 3.28 Winkler beam.

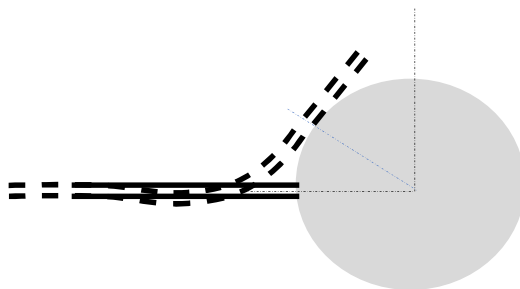
3.3.6.4 Interactie kei en boorstreng

Het model voor de kei is een bol, onsamendrukbaar en plaats vast. De boring boort naar de kei toe. Daarbij zal de hartlijn van de boring in het algemeen niet samenvallen met het middelpunt van de kei/bol, er zal een offset zijn (Figuur 3.29).



Figuur 3.29 Offset boring richting kei.

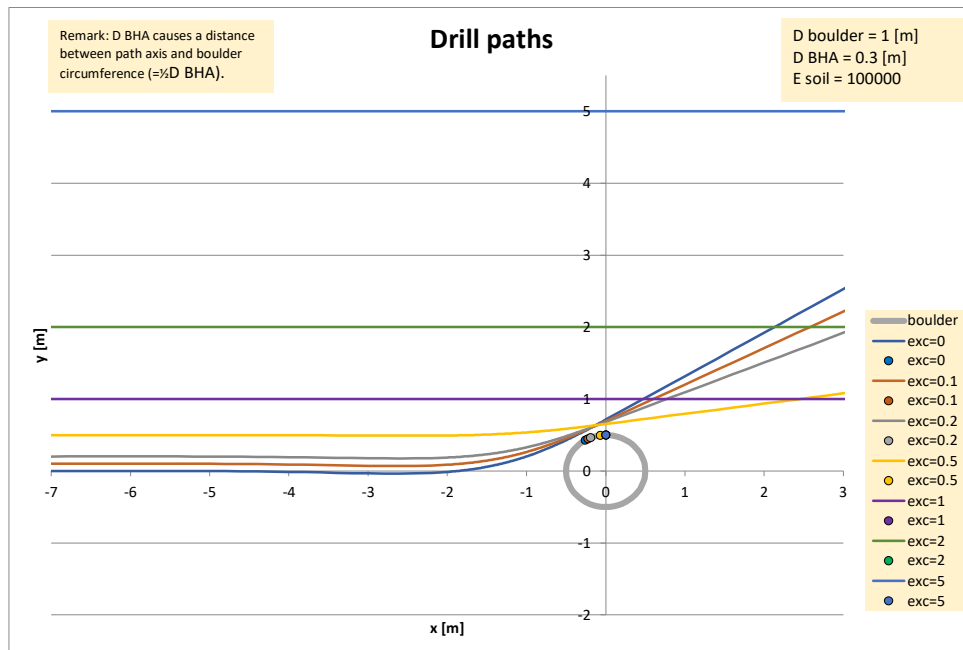
Bij een grote offset wordt de kei gemist, bij een offset gelijk aan nul wordt de kei in het midden geraakt. Als een kei wordt geraakt is de veronderstelling dat de boorkop van de kei afglijdt. Het draaien van de boorkop zorgt dat de boorkop makkelijker langs het oppervlak van de kei schuift (zie Figuur 3.30).



Figuur 3.30 Afketsen boring op kei.

Het resultaat van een serie berekeningen voor een kei met een diameter van 1 m is weergegeven in Figuur 3.31. In de figuur is het hart van de boring weergegeven met een gekleurde doorgetrokken lijn. Het punt waarbij de bol wordt verlaten is weergegeven met een stip met dezelfde kleur. Conform verwachting krijgt de boorlijn die de kei in het centrum raakt de grootste afwijking (blauwe lijn gemarkeerd $\text{exc}=0$).

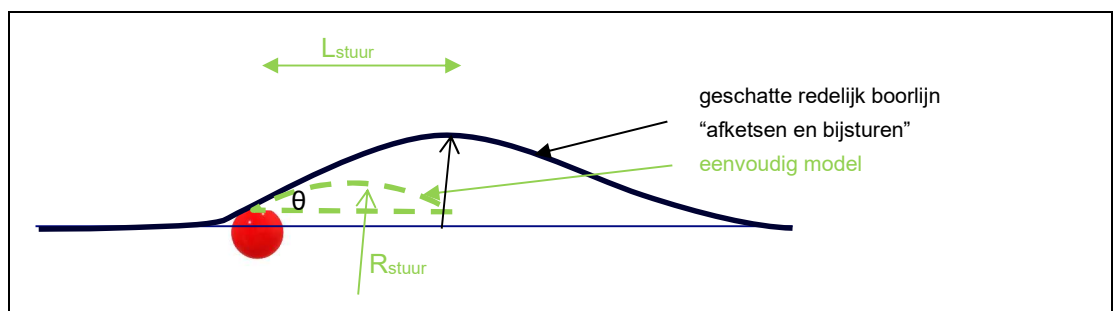
Het punt langs de kei-omtrek waar de boorkop loskomt van de kei is weergegeven met een kleine cirkel op de kei-omtrek met dezelfde kleur als de boring hartlijn. De afstand tussen de kleine cirkel op de kei-omtrek en de boring hartlijn is gelijk aan de halve diameter van de BHA.



Figuur 3.31 Afketsen boring op kei.

3.3.6.5 Bijsturen na botsing

Na de botsing van de boring op een kei is er een afwijking. Mechanisme Z beschrijft het bijsturen door de boormeester om weer op de ontwerp boorlijn te komen. Op dit moment wordt dat model als te gecompliceerd voor deze toepassing beoordeeld. Een pragmatische aanpak is om een boogstraal R_{stuur} te kiezen waarmee de hoek afwijking θ gecorrigeerd wordt (zie ook Mechanisme Z). Zo'n eenvoudige boogvorm is getekend in de onderstaande Figuur 3.32.



Figuur 3.32 Schematische weergave correctie bijsturen.

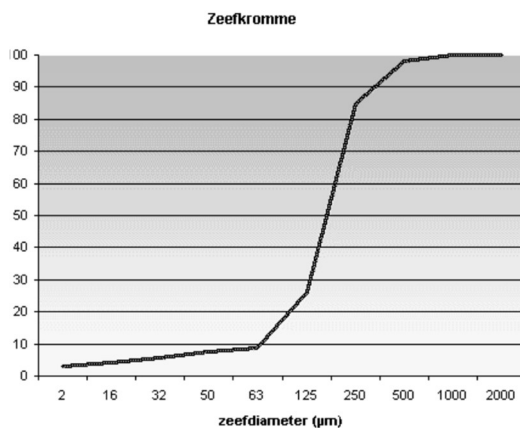
3.3.6.6 Statistiek

In deze paragraaf wordt achtereenvolgens beschreven:

- Statistiek; aandeel keien van zekere grootte in de ondergrond.*
- Statistiek; kans op het raken van kei bij een boring.*
- Statistiek; kans dat de boring de kei in het hart raakt of in de ringen rondom het hart.*
- Statistiek; hoek waaronder de boring afketst van de kei.*
- Statistiek; Verwachtingswaarde uitwijking door de hoek waaronder de boring afketst.*

a) *Statistiek; aandeel keien van zekere grootte in de ondergrond*

De kans dat een boring een kei raakt is klein. In de geotechniek wordt een korrelverdeling gebruikt om het aandeel van een zekere korrelgrootte klasse weer te geven (voorbeeld Figuur 3.33).



Figuur 3.33 Voorbeeld korrelverdeling.

In een korrelverdeling worden grote keien niet opgenomen omdat:

- Grote keien niet mee omhoog komen in een grondboring wegens de grootte van de kei.
- Omdat er geen zeven bestaan om de deze keien te sorteren.

Het feit dat keien normaal gesproken niet zijn opgenomen in een korrelverdeling is geen reden om de korrelverdeling niet te gebruiken voor de weergave van het verwachte aandeel keien.

b) *Statistiek; kans op het raken van kei bij een boring*

De pilotboring boort een cilindervormig gat in een grondlaag over een zekere lengte. De kei is gemodelleerd als een bol met een zekere diameter.

c) *Statistiek; kans dat de boring de kei in het hart raakt of in de ringen rondom het hart*

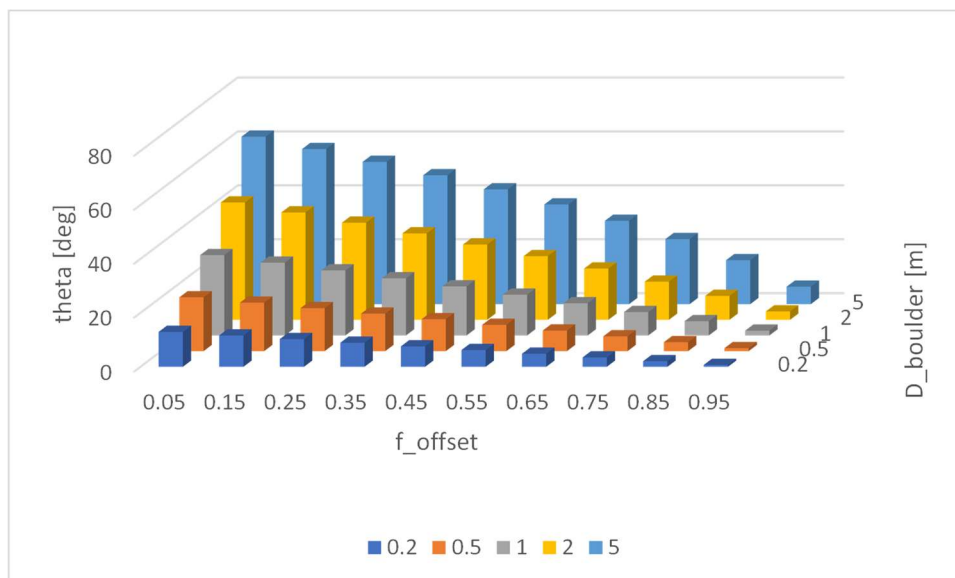
Hoe meer de boring de kei in het hart raakt des te groter de afwijkingshoek is. De afstand tussen het hart van de boorlijn en het hart van de kei wordt hier de offset genoemd.

d) *Statistiek; hoek waaronder de boring afketst van de kei*

De gebruikte informatie voor de assen van Figuur 3.34 is:

- Verticale D_boulder as
item a) bevat de korrelverdeling waarde, hier de kei diameters van 0,2 t/m 5,0 m.
- Horizontale F_offset as
bij item c) wordt de kei beschreven als een relatieve offset van 0,05 t/m 0,95.

Een grafische weergave van de hoek (θ theta [deg]) waaronder de boring afketst afhankelijk van de grootte van de kei (D_{boulder}) en de grootte van de relatieve offset (f_{offset}) is te zien in de onderstaande Figuur 3.34.



Figuur 3.34 Weergave afketsingshoek afhankelijk van grootte kei en grootte offset as boring/kei.

e) *Statistiek; Verwachtingswaarde uitwijking door de hoek waaronder de boring afketst*

Het einddoel is de verwachtingswaarde van de afwijking van een boring. De stappen om tot de verwachtingswaarde van de afwijking/uitwijking van de boring te komen:

1. Bepaal de kans op een kei in de grond.
2. Bereken de kans per meter dat de boring een kei raakt:
3. Bereken de voorwaardelijke kans dat, als een kei wordt geraakt, dat de as van de boring schuift.
4. Bepaal de afketshoek θ .
5. Bereken het Bijsturen na botsing.
6. Bepaal de verwachtingswaarde, dat is de integraal van de uitwijkingen over de beschouwde boorlengte.

3.3.7 Mechanisme Z; bijsturen boormeester

Deze paragraaf beschrijft een model voor het (bij)sturen door de boormeester "Digital twin".

3.3.7.1 Randvoorwaarden

Dit hoofdstuk beschrijft het Digital Twin model voor bijsturen. De twee essentiële aspecten zijn:

1. Actie: het ontstaan van een afwijking van de ontwerp boorlijn door een mechanisme uit de voorgaande paragrafen.
2. Reactie: correctie van de afwijking ten opzichte van de ontwerp boorlijn door bijsturen.

3.3.7.2 Meting positie boorkop

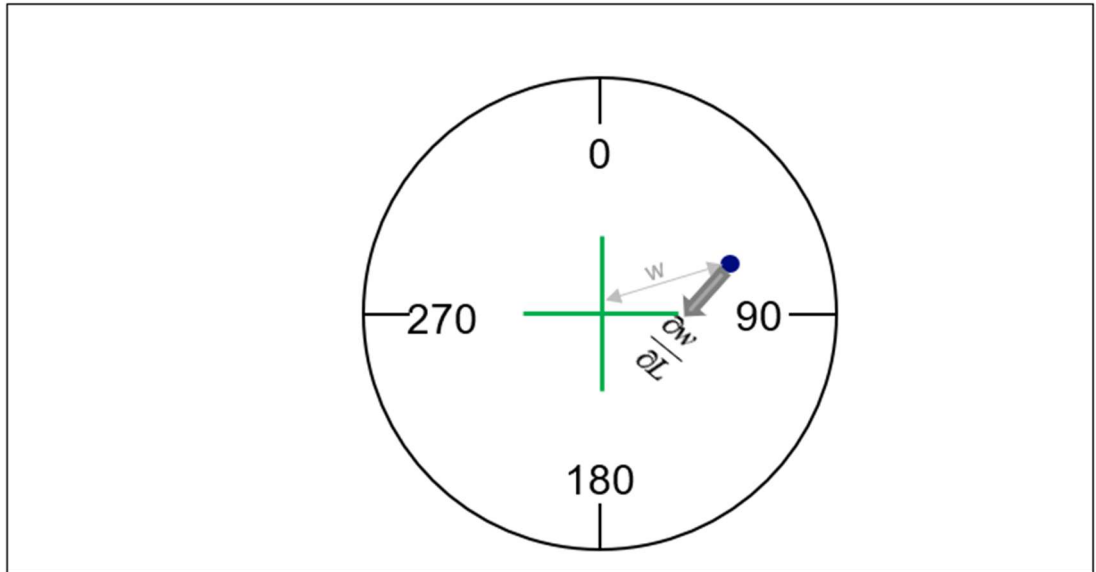
Achter de boorkop zit de meetapparatuur voor de locatie bepaling, dat is vaak een gyroscoop, de onderlinge afstand is in de orde van meters. Omdat de gyro meet op afstand van de boorkop loopt de meetwaarde altijd achter op de werkelijke positie van de boorkop (=latency).

3.3.7.3 Sturing positie boorkop

Een moderne HDD-boormachine heeft een beeldscherm met als midden de positie volgens het ontwerp en als merkpunt de werkelijke positie van de boorkop.

De boormeester probeert het merkpunt op het richtpunt (=het midden) te houden. Als dat niet lukt probeert de boormeester terug te komen op het richtpunt door bij te sturen (zie Figuur

3.35). In Figuur 3.35 is de positie van de boorkop weergegeven met een blauwe punt. De richting waarin de blauwe punt beweegt is ook aangegeven.



Figuur 3.35 Sturen HDD; richten op midden actueel blauwe punt; grijs toevoeging voor dit rapport.

De boormeester kan bijsturen door de boorstreng te draaien. Met het draaien van de boorstreng zorgt de boormeester dat de bocht die de boorkop maakt in de goede richting wijst. Er zijn verschillende oorzaken waardoor de bijsturing een vertraagde reactie is.

3.3.7.4 Drempelwaarde bijsturen

De verwachting is dat de boormeester pas gaat bijsturen als er een duidelijke afwijking is. Een “duidelijke afwijking” is een drempelwaarde.

3.3.7.5 Sturen boorkop met kromming Kappa

Op het scherm ziet de boormeester of het punt van boorkop in de goede richting beweegt. Zolang de beweging van het ontwerppunt af is, stuurt de boormeester harder bij. Als de beweging naar het ontwerppunt toe is, volstaat minder scherp bijsturen.

De boorkop is het voorste punt van de boorstreng, de gyro is daarachter geplaatst. De numerieke uitwerking is weergegeven in de onderstaande Figuur 3.36.



3.3.7.6 Bepaling volgende positie boorkop

The diagram shows a curve of four red points within a rectangular frame. A horizontal dashed line labeled 'ontwerplijn' (design line) is positioned below the curve. A double-headed arrow labeled 'dL' indicates a distance between the first and second points on the curve. Below the curve, three labels are present: $W_{i=0}=$, $W_{i=1}=$, and $W_{i=2}=\text{berekening}$.

Figuur 3.37 Berekening positie boorkop bij simulatie van het boormeester gedrag.

4 Conclusies

Horizontaal gestuurd boren (horizontal directional drilling, HDD) voor aanleg van kabels en leidingen vindt plaats in de ondergrond. Om schade te vermijden aan de omringende ondergrondse en bovengrondse infrastructuur is de nauwkeurigheid onderzocht.

Om de nauwkeurigheid van een HDD in beeld te kunnen brengen en daarmee de kans op schade aan andere infrastructuur te kunnen beoordelen, is het nodig om zowel de meetnauwkeurigheid van de locatie van de boorkop en de te installeren leiding te weten, maar ook de grootte van de afwijkingen door boorproces als gevolg van de samenstelling van de ondergrond te beschouwen. De afwijking bij een horizontaal gestuurde boring bestaat uit twee componenten die bij elkaar moeten worden opgeteld:

- Afwijking door boorproces en ondergrond.
- Afwijking door meetsysteem.

In Nederland is in het gebied met sedimentaire grondsoorten een afwijkingsanalyse gedaan aan de hand van de gegevens van de uitgevoerde HDD-projecten. Voor de HDD-projecten is de afwijking van de geïnstalleerde leidingen ten opzichte van de beoogde ontwerpligging bepaald. De afwijkingsanalyse werd mogelijk gemaakt door de beschikbaarheid van meetgegevens van 25 horizontaal gestuurde boringen in een database. De analyseresultaten laten zien dat de totale afwijking voor het merendeel van de horizontaal gestuurde boringen in de sedimentaire gronden in Nederland kleiner is dan 1,5 m. Twee horizontaal gestuurde boringen in de database laten een grotere afwijking zien van meer dan 3 m.

De oorzaken voor de gemeten afwijkingen zijn geanalyseerd. De mechanismen die de afwijkingen veroorzaken zijn vastgesteld. De belangrijkste mechanismen zijn uitgekozen om verder uit te werken in een model. Deze mechanismen zijn in de verschillende sessies met diverse specialisten zijn uitgewerkt:

- A) Veranderingen in bodemeigenschappen door overgangen van grondlagen.
- B) Opdrijven en zinken door het gewicht van de downhole tools en de leiding in de boorgaten.
- C) Insnijden in de bochten door de bocht reactie tijdens uitoefenen van een trekkracht.
- D) Bocht werking door de interactie van de boorkop en de stijfheid van de boorstreng.
- E) Insluitingen en objecten in de ondergrond.

Deze mechanismen zijn modelmatig uitgewerkt, zodat een voorspelling van de te verwachten afwijking mogelijk is. Hierbij is ook de stuurreactie van de boormeester op de waargenomen afwijkingen tijdens het boren meegenomen. De modelering van de stuurreactie van de boormeester is een zogenaamde 'digital twin' benadering

De afwijking die kan ontstaan door het meetsysteem moet bij de afwijking door boorproces en ondergrond worden opgeteld. Voor de meetsystemen bij horizontaal gestuurde boringen geldt op basis van literatuuronderzoek:

- Gyroscoop, afwijking is ongeveer 0,1 % van de lengte.
- Magnetisch, afwijking is ongeveer 2% van de diepte.
- Walk-over, afwijking is ongeveer 5% van de diepte.

In de literatuur wordt aangegeven dat door aanvullende metingen te verrichten er lokaal op een bepaalde positie een hogere nauwkeurigheid kan worden bereikt.

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