



## STUDIE

# EVALUATIE NIET-DESTRUCTIEVE METHODEN, IN HET BIJZONDER GEOFYSCHE METHODEN VOOR ONDERZOEK VAN DE BRESGEVOELIGHEID VAN VLAAMSE DIJKEN LANGS DE WATERWEGEN

BESTEK NR. WL/07/16

## DEELOPDRACHT 2 : EVALUATIE BRUIKBAARHEID EN BETROUWBAARHEID NIET-DESTRUCTIEVE METHODEN.



Datum: 16/08/2010					
Referentie: 10D_001_LA/DO2/REP001					
Versie	Datum	Uitgave	Geschreven door	Nagezien door	Goedgekeurd door
1	08/03/2010	Ontwerp	DDE, RVL		
2	07/05/2010	Bijkomend onderzoek	DDE, RVL		
3	17/06/2010	Ontwerp	DDE, RVL	GMO, LVI, PPE	
4	16/08/2010	Eindversie	DDE, RVL	GMO, LVI, PPE	PPE
Handtekening					

*G-tec Marine Environment N.V. is enkel verantwoordelijk voor met de hand ondertekende originele afdrukken van dit document.*



VCA\*\*  
Security  
Certified

**G-TEC MARINE ENVIRONMENT N.V.**  
**Geophysical Exploration – Engineering Geology – Hydrographic Survey**

[info.deinze@g-tec.eu](mailto:info.deinze@g-tec.eu) [www.g-tec.eu](http://www.g-tec.eu)

Souverainestraat 58 Bus 4  
B 9800 Deinze - Belgium  
Tel: +32 (0)9 380 45 85 Fax: +32 (0)9 380 43 80



ISO  
9001:2000  
Certified

## DOCUMENT CONTROLEBLAD

### Documentidentificatie

<b>Titel</b>	Deelopdracht 2 : Evaluatie bruikbaarheid en betrouwbaarheid niet-destructieve methoden.
<b>Project</b>	Studie. Evaluatie niet-destructieve methoden, in het bijzonder geofysische methoden voor onderzoek van de bresgevoeligheid van Vlaamse dijken langs de waterwegen
<b>Klant</b>	Waterbouwkundig Laboratorium
<b>Document referentie</b>	10D_001_LA/GP/DO2/REP001
<b>Projectmanager</b>	Davy Depreiter
<b>Offerte referentie</b>	OF_07_121

### Realisatie

Item	Uitgevoerd door	Toezicht/Nazicht door
Acquisitie	-	
Verwerking	DDE, RVL	DDE, RVL
Rapportering	DDE, RVL	DDE, RVL, GMO

### Goedkeuring

Versie	Datum	Geschreven door	Nagelezen door	Goedgekeurd door
1	08/03/2010	DDE, RVL		
2	07/05/2010	DDE, RVL		
3	11/06/2010	DDE, RVL	GMO, LVI, PPE	
3	16/08/2010	DDE, RVL	GMO, LVI, PPE	PPE

### Distributielijst

Naam	Exemplaren	Bedrijf / Overheid	Functie
Patrik Peeters	3 hardcopy + digitaal	Waterbouwkundig Laboratorium	

## INHOUDSTAFEL

1. Inleiding .....	7
2. Situering en achtergrond .....	7
3. Overzicht van toegepaste methodes .....	9
3.1. Elektrische methodes .....	9
3.1.1. Resistiviteitstomografie .....	9
3.1.2. Spontane polarisatie .....	16
3.2. Elektromagnetische methodes .....	18
3.2.1. Grondradar .....	18
3.2.2. Frequentiedomein EM .....	20
3.2.1. Capacitief gekoppelde resistiviteitsmeter .....	23
3.3. Seismische methodes (op land) .....	24
3.3.1. Refractie met P-golven .....	24
3.3.2. Refractie met S-golven .....	25
3.3.3. MASW .....	26
3.3.4. Geotechnische moduli .....	27
3.4. Akoestische methodes (op water) .....	29
3.4.1. Side scan sonar .....	29
3.4.2. Sector scanner .....	30
3.5. Bewezen technologie of methoden .....	33
3.5.1. Magnetische gradiometrie .....	33
3.5.2. Tijdsdomein elektromagnetisme .....	33
3.5.3. Multibeam bathymetrie .....	34
4. Inzetbaarheid van methodes, per faalmechanisme .....	35
4.1. Inleiding .....	35
4.2. Macrostabieliteit .....	36
4.2.1. Beschrijving .....	36
4.2.2. Belasting .....	36
4.2.3. Algemeen .....	37
4.2.4. Beschrijving modelopbouw .....	38
4.2.5. Scenario's .....	39
4.2.6. Basisscenario .....	40
4.2.7. Scenario 1: Invloed van de dikte van de bovenste zandige laag .....	41
4.2.8. Scenario 2: Invloed van de dikte van de tweede kleiige laag .....	43
4.2.9. Scenario 3: Invloed van de pakkingsdichtheid van de zandige laag .....	45
4.2.10. Scenario 4: Invloed van de aanwezigheid van veen .....	45

4.2.11. Scenario 5: Invloed van de consistentie van de kleilaag.....	48
4.2.12. Scenario 6: Invloed van dwarse heterogeniteiten .....	50
4.2.13. Toepassing van het niet-destructief onderzoek .....	53
4.3. Erosie riviertalud en landtalud .....	55
4.3.1. Beschrijving.....	55
4.3.2. Belasting .....	56
4.3.3. Toepassing van het niet-destructief onderzoek .....	58
4.4. Microstabiliteit.....	60
4.4.1. Beschrijving.....	60
4.4.2. Belasting .....	60
4.4.3. Toepassing van het niet-destructief onderzoek .....	61
4.5. Piping.....	62
4.5.1. Beschrijving.....	62
4.5.2. Toepassing van het niet-destructief onderzoek .....	62
4.6. Zettingen .....	63
4.6.1. Beschrijving.....	63
4.6.2. Toepassing van het niet-destructief onderzoek .....	63
4.7. Andere.....	64
5. Samenvatting.....	65
5.1. Inzetbaarheid en betrouwbaarheid van de methoden .....	65
5.2. Toepasbaarheid in functie van faalmechanisme.....	70
6. Conclusies .....	72
7. Bijlage .....	74
8. Bibliografie.....	78

## FIGUREN

Figuur 1: Overzicht van toegepaste methodes en proefsites. (v) = uitgevoerd in het kader van een project in opdracht van W&Z. ....	8
Figuur 2: Resistiviteitstomografie in het veld. ....	9
Figuur 3: Sonderingen S7 (links), S17 (midden), S27 (rechts) vergeleken met resistiviteitswaarden gemeten te Hingene. ....	11
Figuur 4: Sonderingen S2 (links) en S7 (rechts) vergeleken met resistiviteitswaarden gemeten te Hingene. ....	12
Figuur 5: Sonderingen S5 (links), S6 (midden) en S8 (rechts) op de ringdijk te Tielrode en overeenkomstig resistiviteitsprofiel. ....	13
Figuur 6: Bodemmodel op basis van sonderingen met superpositie van weerstandstomogrammen. ....	13
Figuur 7: Niet-polariseerbare electrode en potentiaalmeter. ....	16
Figuur 8: Resultaten van de pontane Polarisation metingen. ....	17
Figuur 9: GPR opstelling 200 Mhz, niet-afgeschermde antennes. ....	18
Figuur 10: 2.3 GHz GPR voor asfaltcontrole. ....	18
Figuur 11: EM31 meting op dijkflank. ....	20
Figuur 12: Genormaliseerde vergelijking van EM34 (horizontale dipool, groen), EM31 (oranje) en de gemiddelde resistiviteit van de bovenste laag (6 m) van een resistiviteitstomogram te Berlare (blauw). ....	22
Figuur 13: Voorbeeld van de infase component meetwaarden langs een dijksegment langs de Schelde gemeten (te Vlassenbroek). De rode kleuren wijzen hier enerzijds op de aanwezigheid van damplanken en anderzijds op de aanwezigheid van een leiding die de dijk kruist. ....	22
Figuur 15: Vergelijking van resistiviteitsbeeld op basis van OhmMapper en klassieke resistiviteitstomografie. .	23
Figuur 14: Ohmmapper toestel. ....	23
Figuur 16: Uitrusting voor het opwekken van P-golven. ....	24
Figuur 17: Opwekken van S-golven. ....	25
Figuur 18: Meetopstelling van geofonen. ....	25
Figuur 19: Voorbeeld van afgeschoven steenbestoringen (rode pijlen). ....	29
Figuur 20: Principe van de sector scanner. ....	30
Figuur 21: Principe van een kaaimuurinspectie met een sector scanner. ....	31
Figuur 22: Mogelijk voorkomen van uitschuring ter hoogte van de onderkant tegen de dijktaalud. ....	32
Figuur 23: Voorkomen van afgeleden stortsteen aan de voet van de dijk. ....	32
Figuur 24: Principe van de multibeam echosounder. ....	34
Figuur 25: Schematische voorstelling van het faalmechanisme afschuiving landtalud. ....	36
Figuur 26: Schematische voorstelling afschuiving riviertaalud. ....	36
Figuur 27: Basisscenario. Landzijde. FOS = 1.16. ....	40
Figuur 28: Basisscenario. Rivierzijde FOS = 1.02. ....	40
Figuur 29: Dikke zandige laag. Landzijde. FOS = 1.67. ....	41
Figuur 30: Dikke zandige laag. Rivierzijde; FOS = 1.24. ....	41
Figuur 31: Dunne zandige laag. Rivierzijde. FOS = 1.06. ....	42
Figuur 32: Dunne zandige laag. Landzijde. FOS = 1.35. ....	42
Figuur 33: Dunne kleiige laag. Landzijde. FOS = 1.19. ....	43
Figuur 34: Dunne kleiige laag. Rivierzijde. FOS = 1.06. ....	43
Figuur 35: Dikke kleiige laag. Rivierzijde. FOS = 1.02. ....	44
Figuur 36: Dikke kleiige laag. Landzijde. FOS = 1.16. ....	44
Figuur 37: Veenlaag bovenaan. Landzijde. FOS = 1.13. ....	46
Figuur 38: Veenlaag bovenzijde. Rivierzijde. FOS = 1.02. ....	46
Figuur 39: Veenlaag onderzijde. Landzijde. FOS = 1.08. ....	47
Figuur 40: Veenlaag onderzijde. Rivierzijde. FOS = 0.86. ....	47
Figuur 41: Vaste klei. Rivierzijde. FOS = 1.62. ....	48

Figuur 42: Vaste klei. Landzijde. FOS = 2.07. ....	48
Figuur 43: Weinig vaste klei. Landzijde. FOS = 0.84. ....	49
Figuur 44: Weinig vaste klei. Rivierzijde. FOS = 0.76. ....	49
Figuur 45: Paterkesdijk aan landzijde, landtalud; FOS = 1.65.....	50
Figuur 46: Paterkesdijk aan landzijde, riviortalud; FOS = 0.98 .....	51
Figuur 47: Paterkesdijk aan rivierzijde,landtalud; FOS = 1.76 .....	51
Figuur 48: Paterkesdijk aan rivierzijde, riviortalud; FOS = 0.96 .....	52
Figuur 49:Schematische voorstelling van het faalmechanisme erosie riviortalud. ....	55
Figuur 50: Schematische voorstelling van het faalmechanisme erosie landtalud. ....	55
Figuur 51: Schematische voorstelling micro(in)stabiliteit landtalud. ....	60
Figuur 52: Schematische voorstelling van het faalmechanisme piping.....	62
Figuur 53: Losgepakt gepakt zand. Landzijde. FOS = 1.16 .....	74
Figuur 54: Losgepakt zand. Rivierzijde. FOS = 1.01 .....	74
Figuur 55: Dicht gepakt zand. Landzijde. FOS = 1.16.....	75
Figuur 56: Dicht gepakt zand rivierzijde. FOS = 1.02 .....	75
Figuur 57: Dicht gepakt zand, dikkezand laag. Landzijde.: FOS = 1.77 .....	76
Figuur 58: Dicht gepakt zand, dikke zandlaag 1, rivierzijde: FOS = 1.22.....	76
Figuur 59: Weinig gepakt zand, dikke zandlaag, landzijde, FOS = 1.51 .....	77
Figuur 60: Weinig gepakt zand, dikke zandlaaf rivierzijde (FOS = 1.00). ....	77

## 1. INLEIDING

Deze studie wil een evaluatie mogelijk maken van niet-destructieve methoden voor onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse dijken. In een eerste fase (Deelopdracht 1; G-tec & IMDC, 2010) werden geofysische metingen uitgevoerd binnen verschillende proefsites. Daarnaast werden stabiliteitsmodelleringen uitgevoerd op diverse dijkprofielen zodat de interpretaties zouden kunnen uitgedrukt worden in termen van bresgevoeligheid.

Dit rapport heeft betrekking op Deelopdracht 2 van de studie en heeft als doel de bruikbaarheid en de betrouwbaarheid van de geofysische methoden te evalueren. Het rapport bestaat uit twee delen: eerst worden de resultaten van de verschillende ingezette methoden samengevat en getoetst aan de beschikbare geotechnische informatie (Hoofdstuk 3), vervolgens wordt per faalmechanisme nagegaan aan de hand van een reeks modelleringsresultaten welke de kritische parameters (hydraulisch, geotechnisch, ...) zijn met betrekking tot dijkstabiliteit en welke geofysische methodes kunnen ingezet worden om deze informatie te bekomen of aan te vullen (Hoofdstuk 4). Tenslotte volgt een samenvatting (Hoofdstuk 5) en conclusies (Hoofdstuk 6).

Al het voorgaande zal uitmonden in een definitief voorstel voor het monitoren van rivierdijken; de voorgestelde methoden moeten in dat geval leiden tot resultaten die toelaten om werkzaamheden aan de waterbouwkundige infrastructuur te optimaliseren en toekomstig gedetailleerd stabiliteitsonderzoek te sturen. Dit maakt het onderwerp uit van Deelopdracht 3.

## 2. SITUERING EN ACHTERGROND

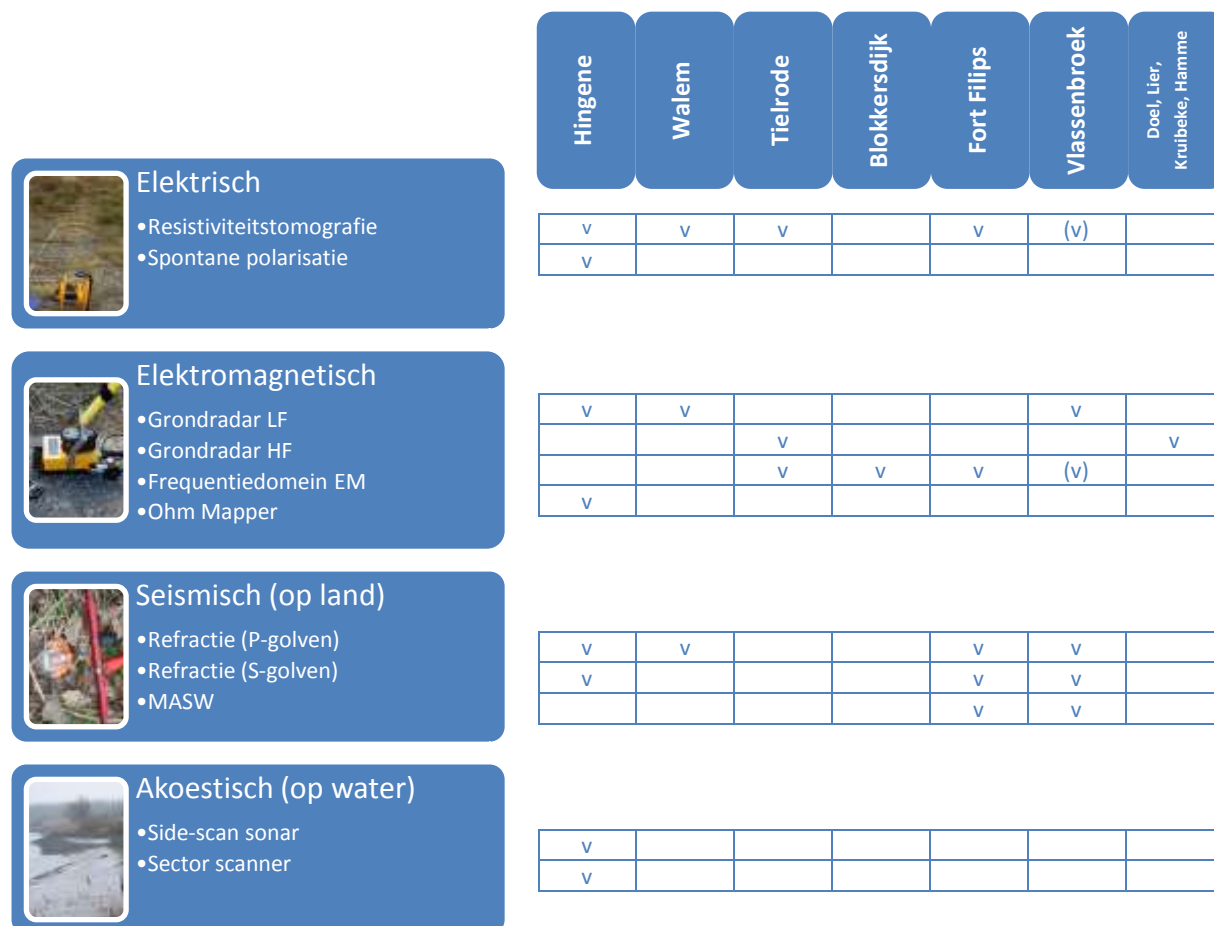
In Deelopdracht 1 werden een groot aantal geofysische methodes toegepast op verschillende proefsites. In Figuur 1 wordt een matrix weergegeven die uitdrukt welke technieken op welke site werden toegepast.

De meetresultaten van Deelopdracht 1 werden gerapporteerd in deelrapporten. Er wordt voor een volledige beschrijving en bespreking van deze resultaten verwezen naar deze individuele deelrapporten:

- Hingene
  - o Rapport pilootproef (Ref. 08\_022\_Dijken\_Antwerpen)
  - o Rapport spontane polarisatie 10D\_001/LA/HING/REP002
- Walem
  - o Rapport 08D\_007/EG/GP/REP001
- Tielrode (excl. HF GPR)
  - o Rapport 08D\_007/EG/GP/TIELR/REP001
  - o Rapport 10D\_001/LA/TIELR/REP002
- Blokkesdijk
  - o Rapport 08D\_007/EG/GP/BLOK/REP001
- Dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel:
  - o Rapport 08D\_007/EG/GP/FF/REP001
  - o Rapport 10D\_001/LA/FF/REP002
- Vlassenbroek
  - o Rapport 10D\_001/LA/VLA/REP002
- Doel, Lier, Kruibeke, Hamme, Tielrode (HF GPR):
  - o Rapport 08D\_007/EG/GP/RADAR/REP001

Een aantal van deze rapporten bevatten stabiliteitsmodelleringen. Deze werden uitgevoerd indien geotechnische informatie (CPT) beschikbaar was en indien dit relevant was voor de interpretatie van de metingen.

Er bestaat een gelijkenis tussen dit project en een project in opdracht van NV Waterwegen & Zeekanaal “Studie stabiliteit van dijken met behulp van niet-destructieve methodes in het kader van het geactualiseerde Sigmoplan” (Besteknr. 16EI/08/52), uitgevoerd door IMDC NV en G-tec NV. Als onderdeel van dit project worden dijken in beeld gebracht met een geo-elektrische techniek (resistiviteitstomografie) en een elektromagnetische techniek (frequentiedomein EM). De gegevens van de metingen uitgevoerd op de dijk ter hoogte van Vlassenbroek werden tussen beide projecten uitgewisseld.



Figuur 1: Overzicht van toegepaste methodes en proefsites.  
(v) = uitgevoerd in het kader van een project in opdracht van W&Z.

Een aantal methodes die kunnen beschouwd worden als bewezen technologie, zijn in het project niet ingezet. Deze betreffen

- de magnetische gradiometrie die kan ingezet worden voor de detectie van metalen (ferromagnetische) leidingen en damplanken
- EM61, een tijdsdomein elektromagnetische methode die ook wordt ingezet voor de detectie van ondiepe (tot 2 m) metalen objecten
- Multibeam bathymetrie, een onderwatertechniek voor het opmaken van gedetailleerde kaarten van de bodemmorfologie.



### 3. OVERZICHT VAN TOEGEPASTE METHODES

#### 3.1. Elektrische methodes

##### 3.1.1. Resistiviteitstomografie

###### i. Principe en uitvoering

Resistiviteitstomografie betreft een geo-elektrische techniek waarbij een resistiviteitsbeeld van de ondergrond wordt gebouwd door middel van inversie van weerstandsmetingen aan het oppervlak (Figuur 2).

De meting bestaat enerzijds uit het aanleggen van een stroom tussen twee stroomelektroden en anderzijds uit het meten van een resulterende potentiaal tussen twee meetelektroden. Hieruit wordt een schijnbare resistiviteit berekend. Indien deze elektroden dicht bij elkaar liggen, zal dit voornamelijk de elektrische eigenschappen van de ondiepe bodem ter hoogte van de elektroden in beeld brengen. Als de afstand tussen de elektroden verhoogd wordt, zullen de stroomlijnen in toenemende mate invloed van de diepere ondergrond voelen. Het inversieproces houdt in dat een model van de resistiviteit van de ondergrond iteratief wordt aangepast totdat het verschil tussen gemeten en berekende schijnbare resistiviteit kleiner wordt dan een bepaalde tolerantie. Het resulterende bodemmodel stelt de resistiviteitsstructuur van de ondergrond voor. De bodemresistiviteit wordt bepaald door het sedimenttype, grondwater, porositeit, ... Hoge resistiviteiten (> 100 ohm.m) zijn typisch voor zandige, droge bodemtypes terwijl lage resistiviteiten (< 40 ohm.m) gelden voor kleiige en natte bodemtypes. Voor een betrouwbare interpretatie is calibratie aan boorgegevens of geotechnische gegevens vereist.

###### ii. Meetresultaten

De resistiviteitstomografie is de vaakst toegepaste techniek binnen dit project. De metingen zijn uitgevoerd zowel in de lengterichting als in de dwarsrichting over de dijken.

###### *Profielen evenwijdig aan de dijk*

De metingen te Hingene tonen aan dat er aanzienlijke variaties in resistiviteit bestaan op een profiel gemeten op de kruin van de dijk. De resistiviteitsstructuur van het dijklichaam toont een horizontale afname van de gemiddelde resistiviteit van west naar oost, van > 100 ohm.m tot < 40 ohm.m. Dit wijst op een verandering in bodemtype. Bovendien is er een verticale variatie zichtbaar: een toplaag van 1.5 m dik vertoont middelmatige waarden en komt voor boven op een 3-4 m dikke laag met hoge resistiviteit. Dieper dan 4-5 m, dus onder de



Figuur 2: Resistiviteitstomografie in het veld.

dijk en overeenkomend met polderafzettingen, zijn de waarden lateraal homogeen en laag (< 20 ohm.m). Deze lage waarden worden ook opgetekend in een profiel langs de voet van de dijk (aan landzijde).

Metingen te Walem en op dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel bevestigen dat een sterk variërende dijkopbouw goed in beeld wordt gebracht en dat ook hier sterke laterale en verticale variaties bestaan: een hoog-resistieve toplaag die in dikte varieert en een diepe laag-resistieve meer homogene eenheid worden goed onderscheiden. Er is tevens een duidelijk contrast tussen dijksegmenten met hoge resistiviteit tegenover gemiddelde resistiviteit. In de diepte worden soms hoog-resistieve anomalieën aangetroffen.

Te Tielrode is op de ringdijk een dijksegment waarvan de samenstelling afwijkt van de rest van de dijk, opgespoord met behulp van een elektromagnetische methode (zie verder). Beeldvorming met resistiviteitsstomografie toont aan dat er een scherpe en lokale verdikking is van een hoog-resistieve toplaag die verder langs het profiel geleidelijk weer afneemt in dikte.

Langteprofielen te Vlassenbroek tonen eveneens aan dat dikteveranderingen van de hoog-resistieve toplaag scherp in beeld gebracht kunnen worden.

#### *Profielen dwars over de dijk*

Dwarsprofielen over de dijk zijn over het algemeen relatief kort omdat de inplanting van de elektroden aan rivierzijde niet mogelijk of zeer beperkt is door het voorkomen van (breukstenen of andere harde) bekleding of mogelijke oorzaken die contact met de bodem verhinderen. Aan landzijde kan de beperking bestaan uit een diepe gracht of een verkeersweg. Dit beperkt dan ook de diepte waarover kan gemeten worden. Te Hingene kon echter de toplaag met middelmatige resistiviteit onderscheiden worden van de dieper voorkomende lage resistiviteitswaarden.

Op de dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel zijn lange profielen opgenomen omdat de dijk er heel breed is; deze brengen dus wel diepe resistiviteitsinformatie aan. De profielen tonen aan dat er ook lateraal belangrijke resistiviteitsvariaties bestaan. In dit specifiek geval kon bv. het bestaan van een toplaag met middelmatige resistiviteit die een hoogresistieve dijk kern bedekt, afgeleid worden. Onder de dijk komt een laag-resistieve, homogene afzetting voor.

Te Walem zijn eveneens dwarsprofielen opgemeten. Het dieptebereik onder de dijk is beperkt, maar hier is meer informatie beschikbaar van het polderland binnen de dijk. De dijk zelf bestaat uit een hoog-resistieve toplaag boven op een laag met lage resistiviteit. Weg van de dijk blijft de hoog-resistieve toplaag bestaan; het contrast met de laag-resistieve ondergrond neemt af.

#### *Bijkomende relevante opmerkingen*

Vermoedelijke micro-instabiliteit aan het onderste gedeelte van de dijkflank, gepaard gaande met het voorkomen van een waterplas op de asfalt straatbedekking, kan niet gecorreleerd worden met anomalieën in de resistiviteitsstructuur (Hingene).

Herhaalde metingen te Hingene tonen ook aan dat het getij geen invloed heeft op de meetresultaten (Hingene).

### **iii. Correlatie met geotechnische informatie**

Bij elke lokatie wordt de referentie naar het relevante rapport van de geotechnische metingen uitgevoerd door VO – afdeling Geotechniek, vermeld.

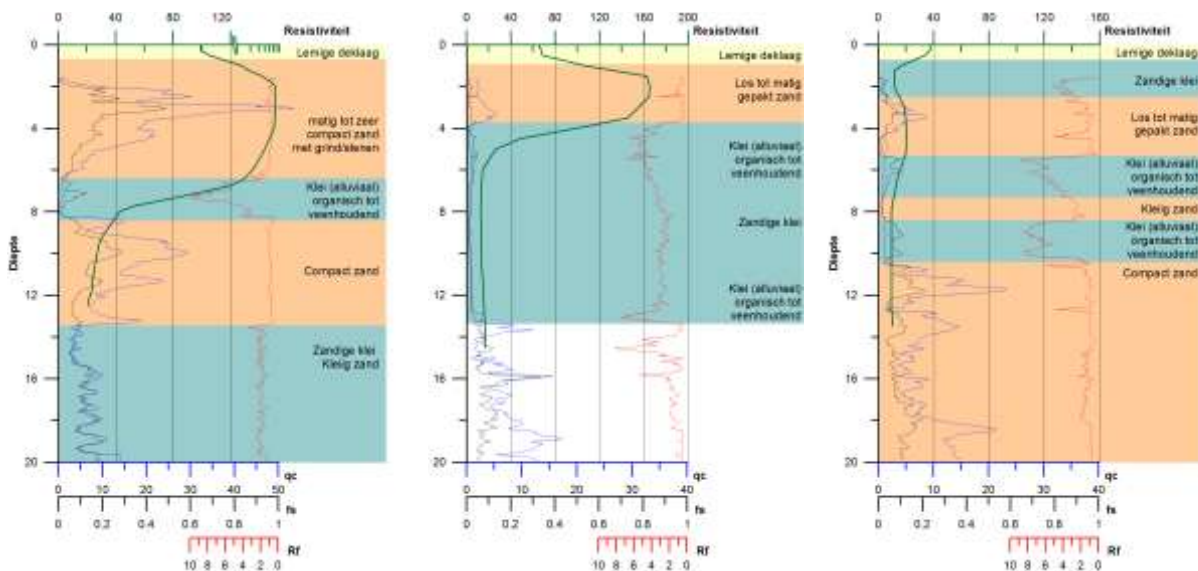
#### *Hingene (Rapport Geo-07/167; Figuur 3)*

Drie sonderingen vallen ongeveer in het midden van resistiviteitsprofielen die werden opgemeten (S7, S17 en S27). Op elke locatie is de CPT signatuur zeer verschillend en dit komt ook tot uiting in de resistiviteitsprofielen. In Figuur 3 worden de resistiviteitswaarden voorgesteld die dicht bij de CPT lokatie liggen.

S7 toont bovenaan een dikke compacte zandlaag met zeer compact of stenig materiaal. Onder de zandlaag zit een veenhoudende kleilaag en nog dieper worden opnieuw compacte zanden waargenomen. De resistiviteit toont een dunne toplaag met gemiddelde resistiviteit. Deze is niet zichtbaar op de sondering omdat de sondering pas op 2 m diepte aangevat wordt. Echter, deze laag is vermoedelijk een lemige laag die als afdekking van de dijk dient. De dikke zandlaag met hoge conusweerstand komt overeen met een zone met zeer hoge resistiviteit; ook dit wijst op stenig materiaal in de ondergrond. Dieper nemen de resistiviteitswaarden snel af, ter hoogte van de kleiige laag. De helling is het grootst waar het kleefgetal  $R_f$  het grootst is. Dieper worden de resistiviteitswaarden zeer laag, onafhankelijk van het sedimenttype.

Sondering S17 vertoont een zandige laag bovenop een dikke laag venige tot zandige klei. Het resistiviteitsprofiel toont een goed onderscheid tussen deze twee lagen. De overgang van hoge naar lage resistiviteiten komt overeen met de grens op basis van de CPT gegevens bepaald. Bijkomend brengt de resistiviteitsmeting ook nog de toplaag met gemiddelde resistiviteit in beeld.

Sondering S27 brengt een afwisselend patroon tussen klei en zand in beeld. De bovenste kleilaag en zandlaag kunnen nog onderscheiden worden in de resistiviteitsgegevens, alsook de toplaag zoals in sonderingen S7 en S17. Diepere sedimentologische variaties worden niet meer onderscheiden op de resistiviteitsgegevens.



Figuur 3: Sonderingen S7 (links), S17 (midden), S27 (rechts) vergeleken met resistiviteitswaarden gemeten te Hingene.

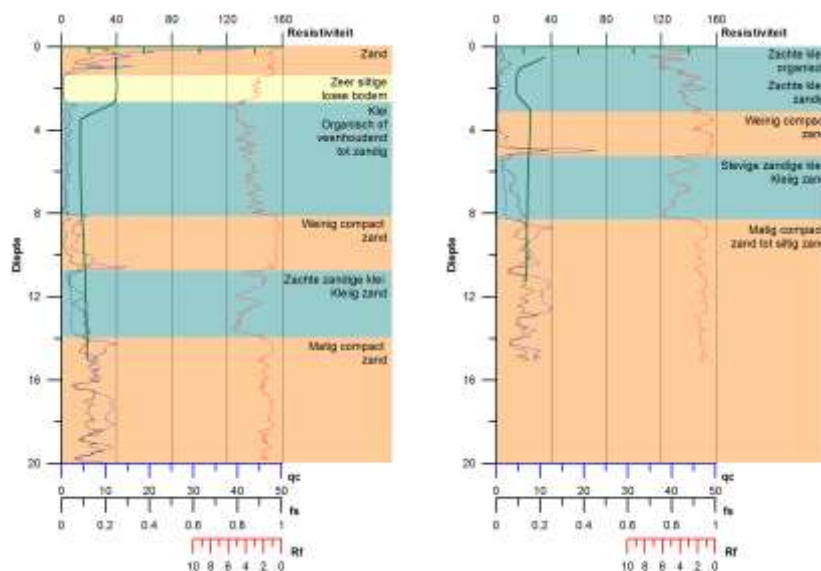
#### Walem (Rapport GEO-07/1032; Figuur 4)

Het voorkomen van een verzakking van de dijk vormt een bijzonder aandachtspunt. De gegevens zijn in detail besproken in het rapport 08D\_007/EG/GP/REP001.

Er zijn sonderingen beschikbaar op de kruin en aan de voet (aan landzijde) van de dijk. Sonderingen op de kruin tonen een 1 tot 1.5 m dikke zandige toplaag bovenop 1 meter zeer losse, siltige bodem en 6-7 meter zachte klei die naar onder toe meer silt/zand bevat. Nog dieper komt weinig tot matig gecompacteerd zand voor (3 m dik), stevige zandige klei (3 m) en nog dieper matig compact siltig zand. De resistiviteitsmetingen tonen er een toplaag met middelmatige resistiviteit bovenop een dikke laag (~10 m) met lage resistiviteit. De resistiviteit neemt met de diepte zeer lichtjes toe. De geotechnische en geofysische waarnemingen vertonen een aantal overeenkomsten: er is een onderscheid tussen een top- en onderlaag, de overgang tussen beide ligt ter hoogte van de overgang tussen de siltige en de kleiige laag. Er is in de resistiviteit geen onderscheid tussen de twee bovenste lagen, noch tussen de verschillende diepere lagen.

Een opvallend gegeven dat weergegeven is in rapport 08D\_007/EG/GP/REP001 is de overeenkomst tussen de locatie van de scheurzone en de lagere waarden van de resistiviteit van het dijklichaam zelf.

Een sondering aan de voet van de dijk ter hoogte van de scheurzone (S7) toont een 3 m dikke zachte kleiige toplaag met dunne zandige tussenlagen bovenop een 2 m dikke laag los zand. Dieper komt stevigere klei (3 m) voor boven op compacter zand. De over het algemeen lage resistiviteit tekent een initieel dalende waarde op om op 1 m diepte de laagste waarden te bereiken. Een lichte stijging komt ongeveer overeen met de overgang naar zandiger sedimenten. Diepere veranderingen (naar klei, of compacter zand) zijn niet te onderscheiden.



Figuur 4: Sonderingen S2 (links) en S7 (rechts) vergeleken met resistiviteitswaarden gemeten te Hingene.

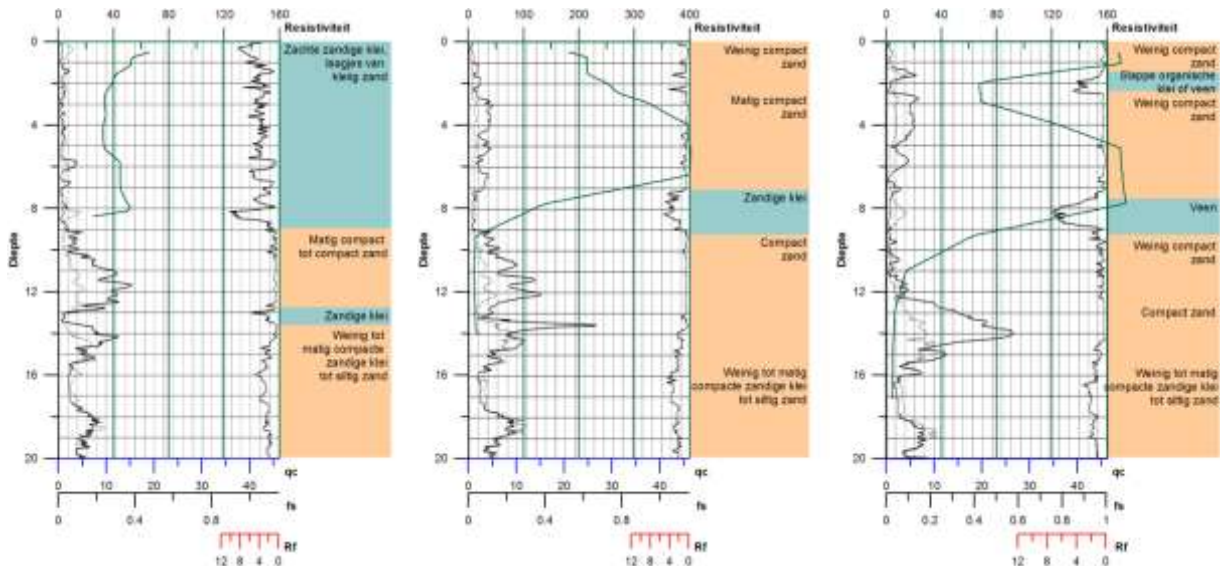
Stabiliteitsberekeningen (zie rapport 08D\_007/EG/GP/REP001) tonen aan dat de dikke slappe kleilaag aanwezig in het dijklichaam (zie S2 in Figuur 4, tussen 2 en 8m diepte) ter hoogte van de scheurzone verantwoordelijk kan gesteld worden voor een mogelijke afschuiving langsheen landzijde ( $FOS < 1$ ). Piping is ook een mogelijk fenomeen, maar er werden geen uitspoelingen waargenomen.

#### Tielrode (Rapport GEO-09-089)

Te Tielrode werden een groot aantal sonderingen geplaatst ter hoogte van een resistiviteitsprofiel ter correlatie van beide metingen. Een volledige beschrijving en bespreking is beschikbaar in rapport 10D\_001/LA/TIELR/REP002.

De interpretatie als lagen van sonderingen S5, S6 en S8 worden hieronder hernomen en in combinatie met een resistiviteitsprofiel weergegeven omdat ze de variabiliteit in de gegevens goed illustreren. De ruwe data van de sonderingen waren nog niet beschikbaar.

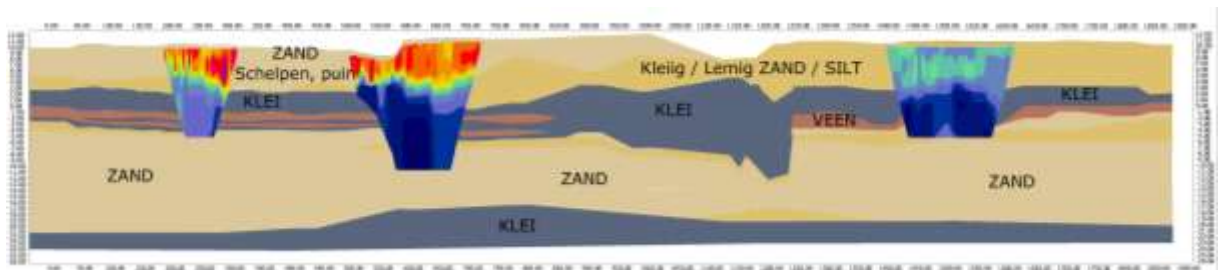
Sondering S5 bestaat uit een kleiige zandige toplaag boven op zandige afzettingen. De resistiviteit op die plaats is gemiddeld, rond de 40 ohm.m. Er is een kleine stijging rond 6-8 m diepte tot tegen 50 ohm.m overeenkomend met een zone waar meer zandige lagen optreden. De daling van de resistiviteit onderaan het profiel komt overeen met een dunne laag met hoog kleefgetal. Sondering S6 is slechts 15 meter verder opgenomen en vertoont een volledig verschillend patroon: er is een weinig tot matig compacte zandige toplaag om pas rond 8 meter een zandige klei te bereiken. Nog dieper zijn compacte zanden aanwezig. De resistiviteit neemt continu toe tot rond 4 meter, wat samenvalt met een toenemende compactie. Tussen 4 en 8 meter wordt een maximum waargenomen, de resistiviteitswaarden zijn zeer hoog. Tussen 7 en 9 meter daalt de resistiviteit zeer snel; op die diepte worden kleiige sedimenten waargenomen. Nog dieper blijft de resistiviteit laag. Sondering S8 is uitgekozen wegens het optreden van een ondiepe slappe kleiige laag tussen weinig tot matig compacte zanden. De resistiviteit brengt die afwisseling goed in beeld. Dieper worden lage resistiviteitswaarden bereikt vanaf de diepte waarop kleiige tot venige afzettingen aanwezig zijn.



Figuur 5: Sonderingen S5 (links), S6 (midden) en S8 (rechts) op de ringdijk te Tielrode en overeenkomstig resistiviteitsprofiel.

#### Dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel

De dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel is op basis van een groot aantal sonderingen een bodemmodel in de lengterichting van de dijk opgebouwd. Hierop zijn resistiviteitstomogrammen gesuperponeerd (Figuur 6). De gedetailleerde beschrijving is beschikbaar in rapport 08D\_007/EG/GP/FF/REP001.



Figuur 6: Bodemmodel op basis van sonderingen met superpositie van weerstandstomogrammen.

Er blijkt een goede kwalitatieve overeenkomst tussen de geotechnische gegevens (en de hieruit geïnterpreteerde bodemtypes) en de resistiviteitswaarden: een hoge resistiviteit komt overeen met droog puin- en schelphoudend zand, gemiddelde waarden met lemige bodems. De laagste waarden treden op vanaf het optreden van een (veenhoudend) kleipakket. Diepere zandafzettingen kunnen echter niet gediscrimineerd worden op basis van de resistiviteitsgegevens.

Een stabiliteitsmodellering (zie rapport 08D\_007/EG/GP/FF/REP001) toonde aan dat diepe afschuivingen in het gebied onwaarschijnlijk zijn. Verder werden overeenkomsten gevonden tussen variaties in pakkingsdichtheid en resistiviteitsmetingen die ook weerspiegeld werden in de variaties van de FOS waarden.

Er werden vier dwarsprofielen met resistiviteitstomografie opgenomen (zie rapport 10D\_001/LA/FF/REP002). Ook hieruit bleek een goede overeenkomst tussen resistiviteit en bodemtype gebaseerd op basis van de sonderingen. De dwarsstructuur van de dijklichamen bleken echter veel complexer te zijn dan wordt aangenomen op basis van de beschikbare sonderingen, wat het belang voor het inzetten van de resistiviteitstomografie voor het bepalen van de dwarse structuur van dijken onderstreept. Dit levert belangrijke informatie voor het opbouwen van de stabiliteitsmodellen. Een beperkende factor is echter dat voldoende afstand nodig is over de dijk om voldoende dieptebereik te hebben.



### *Vlassenbroek*

In het kader van de opdracht van NV Waterwegen & Zeekanaal “Studie stabiliteit van dijken met behulp van niet-destructieve methodes in het kader van het geactualiseerde Sigmaphan” (Besteknr. 16E1/08/52) werden langspanprofielen met resistiviteitstomografie op de dijk opgenomen. Deze gegevens toonden belangrijke laterale variaties aan in de dikte van de zandige toplaag, wat goed overeen komt met gegevens op basis van sonderingen.

## **iv. Betrouwbaarheid van de methode**

### *Uitvoering*

Resistiviteitstomografie blijkt vrij algemeen inzetbaar. De belangrijkste beperking naar uitvoering toe is mogelijke belemmering van het inplanten van elektroden in de bodem. Op dijken is het voornamelijk het voorkomen van steenbestorting, (steen)asfalt, etc. aan rivier- en/of landzijde van de dijk dat voor belemmering kan zorgen. Immers, indien geen elektrisch contact tussen de meetopstelling en de bodem bestaat, dan zullen de aangelegde stroombanen verstoord zijn en mogelijk geen informatie leveren over de elektrische structuur van de ondergrond.

Bij uitvoering in de lengterichting is voornamelijk het voorkomen van steenasfalt onder een dunne bodemlaag potentieel problematisch. Asfalt vormt een isolator, maar indien deze nat is en/of goed ingeworteld, bestaat de mogelijkheid dat er toch voldoende contact kan gemaakt worden met de ondergrond. In het ideale geval zouden kleine gaatjes (< 2 cm diameter) geboord moeten worden doorheen de steenasfalt (10-15 cm dik) waarin de elektroden kunnen geplaatst worden om rechtstreeks bodemcontact te maken.

Voor dwarsprofielen vormt steenbestorting aan rivierzijde een belangrijke beperking: de steenblokken hebben een open structuur en de bodem is meestal niet bereikbaar. Een praktische oplossing kan hiervoor niet geleverd worden.

Ter bevordering van het contact met de bodem kan bovendien de bodem ter hoogte van de elektroden zelf nat gemaakt worden met zout water.

### *Resolutie en dieptebereik*

Resistiviteitstomografie wordt typisch uitgevoerd met 48 of 64 elektroden. De spatiëring van de elektroden varieert normaal tussen 1 m en 5 m. De resolutie van de resultaten varieert mee met de elektrodenspatiëring en de resolutie neemt af met de diepte. De minst diepe punten van het bodemmodel hebben een resolutie van ongeveer de helft van de elektrodenspatiëring.

Het dieptebereik van de methode hangt af van de totale lengte van de opstelling en begraagt ongeveer  $1/5^e$  van de totale lengte van de opstelling. Bij een opstelling met elektrodenspatiëring van 1.5 meter en 64 elektroden wordt dus een lengte van 94.5 m bereikt en bijgevolg dus een maximale diepte van 20 m. Er moet bij de interpretatie wel rekening gehouden worden met een afnemende resolutie bij toenemende diepte.

Een bijkomend gegeven is dat met toenemende diepte de lengte waarover gegevens bekomen worden, afneemt! Dit is een gevolg van de methode zelf maar kan voorkomen worden door een ruimere zone in te meten. Profielen kunnen verlengd worden met de zogenaamde *roll-along* methode waarbij een aantal elektroden van het begin van het profiel verplaatst worden naar het einde, en de meetopstelling geleidelijk aan opschuift.

### *Modelleren, interpretatie en relatie tot bodemtypes*

De tomografische beeldvorming bevat een inversiestap in de verwerking. Zoals elke inversie is het resultaat van de berekening niet uniek. Er zijn echter mogelijkheden om de kwaliteit van het resultaat te controleren, o.m. door het herhalen van de berekening met verschillende parameters of oplossingsmethodes.

De resultaten van het model geven uiteindelijk een 2D-profiel van resistiviteitswaarden. De waarden zelf zijn te beschouwen als een soort volumetrisch gemiddelde. Scherpe grenzen worden niet als dusdanig in beeld gebracht, maar als een overgang tussen twee resistiviteitswaarden. De waarden die tijdens de proeven bekomen zijn, variëren tussen 1 en 1000 ohm.m (Tabel 1). De overgangen tussen pakketten met homogene resistiviteit blijken vrij goed samen te vallen met de grenzen tussen grote pakketten met homogene sedimentologie.

De hoogste waarden (100-1000 ohm.m) worden enkel aan het oppervlak bekomen en kunnen geïnterpreteerd worden als een droog zandig (tot stenig voor de hoogste waarden) dijklichaam. Waarden tussen 40 en 100 ohm.m kunnen gecorreleerd worden met lemige, vochtige sedimenten. Waarden onder 40 ohm.m komen meestal in de diepte voor, in de met water verzadigde zone. Het optreden van een zandlaag onder een kleilaag in de gesatureerde zone kan meestal niet meer onderscheiden worden. Een van de redenen hiervoor is dat bij de meting die een diepere invloed zou moeten hebben, de stroom preferentieel door de goed geleidende kleilaag zal lopen. Dit vormt een beperking van de methoden naar diepte toe. Dicht bij het oppervlak, in de ongesatureerde zone, treedt dit effect niet op omdat de geleidbaarheid van eerder droge kleien minder hoog is zodat deze de stroom niet preferentieel zullen geleiden.

*Tabel 1: Indicatieve resistiviteitswaarden voor verschillende bodem types waargenomen in dijklichamen boven de grondwatertafel*

Indicatie resistiviteit (ohm.m)	Bodemtype
100 -1000	Zand (toenemende compactie of hoeveelheid stenig materiaal)
40 -100	Lemig, zandige klei, kleilig zand
< 40	Klei
< 20	Natte klei

#### *Verhouding tot geotechnische gegevens*

De geotechnische en geofysische gegevens zijn zeer verschillend van natuur en resolutie. Een sondering zal een verticaal profiel op één punt opleveren maar met hoge verticale resolutie (typisch 5 cm). De resistiviteitsstomografie levert relatief lage resoluties op, maar wel 2D profielen. Bovendien blijkt dat tenminste in de ongesatureerde zone het grootschalig lagenpatroon dat aanwezig is in de sonderingsgegevens, zeer goed wordt weerspiegeld in de resistiviteitsgegevens. De laterale continuïteit van de lagen (of de heterogeniteit) wordt in de ongesatureerde zone zeer goed in beeld gebracht.

Fauchard & Mériaux (2007) duiden de methode aan als inzetbaar in combinatie met efficiëntere methodes (zoals de elektromagnetische methodes, zie verder) en/of om correlaties met of tussen geotechnische data uit te voeren.

### 3.1.2. Spontane polarisatie

#### i. Principe en uitvoering

Ondergrondse waterstromingen kunnen gedetecteerd worden met behulp van de spontane polarisatie (SP) methode of zelf-potentiaal methode (*spontaneous polarization, self-potential*).

De methode berust op het detecteren van afwijkingen van de natuurlijke bodempotentiaal (zie bv. Keary, Brooks & Hill, 2002) als gevolg van elektrochemische reacties in de ondergrond. De methode wordt typisch toegepast voor het opsporen van metallische sulfide-afzettingen of andere ertsen. Deze afzettingen veroorzaken sterke redox-reacties die sterke potentiaal anomalieën opleveren. Een andere toepassing betreft het opsporen van grondwaterstromingen. Ondergronds stromend water gaat gepaard met de advectie van ionen wat leidt tot potentiaal anomalieën.

De uitvoering van de meting bestaat uit het meten van het potentiaalverschil met een gevoelige (hoge-impedantie) voltmeter tussen een stationaire basis- of referentie-elektrode en een mobiele meetelektrode. Voor en na een reeks metingen wordt de referentiepositie opgemeten om de meetwaarden te compenseren voor de drift van de metingen door het verdelen van de afwijking aan de referentiepositie.

#### ii. Meetresultaten

Testmetingen werden uitgevoerd bij laag water en hoog water op de dijkflank te Hingene ter hoogte van een waterplas aan de voet van de dijk. Deze plas is permanent aanwezig en duidt vermoedelijk op microinstabiliteit. De lemige bedekking aan de voet van de dijk was op verschillende tijdstippen van waarneming zeer nat en weinig draagkrachtig.

De metingen werden herhaald bij laag en hoog tij. Het afsmelten van sneeuw tussen de beide meetreeksen door kan mee geleid hebben tot een verandering van de meetwaarden. De meetwaarden tonen per locatie een relatief grote variabiliteit. De waarden variëren tussen -3.8 mV en 33.9 mV bij laag tij en tussen -8.5 mV en 27.8 mV bij hoog tij. Over het algemeen liggen de potentiaalverschillen opgenomen bij laag tij (rivierpeil +/- 0.2 m TAW) hoger dan de waarden opgenomen bij hoog tij (+/- 5.6 m TAW). De individuele meetwaarden waren wel opvallend stabiel, wijzend op een hoge nauwkeurigheid van een individuele meting.

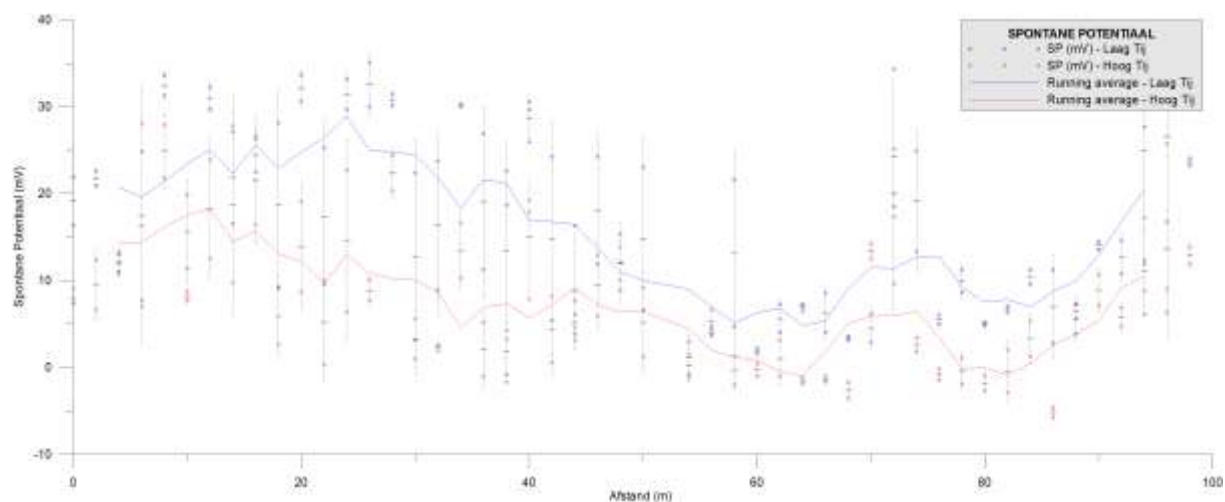
Tussen 50 en 70 m langs het SP-meetprofiel worden lage waarden opgemeten. De drassige zone bevindt zich ter hoogte van profielafstand 65 m. Verder langs het profiel, tot 90 m, worden nog steeds lage waarden gemeten. Deze lage waarden vormen samen een anomalie en wijzen op een elektrochemisch proces in de ondergrond, hier geïnterpreteerd als een effectieve grondwaterstroming doorheen of onder de dijk. De oostwaartse uitbreiding van de anomalie ten opzichte van de waterplas of ijsplek kan erop wijzen dat de stroming van het grondwater schuin doorheen de dijk gaat in plaats van haaks erop en dat het intredepunt dus niet recht tegenover het uittredepunt ligt.

Het valt ook op dat de lage SP-waarden een veel lagere standaarddeviatie vertonen ter hoogte van het minimum; de kans bestaat dat het effect van de lokale anomalie veroorzaakt door grondwaterstroming veel belangrijker is dan de effecten van de aanwezigheid van stenen en dat hierdoor de lagere waarden veel stabielere uitvallen.



Figuur 7: Niet-polariseerbare elektrode en potentiaal meter.





Figuur 8: Resultaten van de pontane Polarisatie metingen

### iii. Betrouwbaarheid van de methode

De meetresultaten ter hoogte van de anomalie zijn onafhankelijk van het getij, wat hydrologisch gezien te verklaren valt. Buiten de anomalie zijn er wel verschillen maar het verschil is relatief klein en kan mee veroorzaakt zijn door het smelten van de sneeuw tussen de twee meetreeksen.

De algemene betrouwbaarheid kan op basis van deze ene testmeting niet beoordeeld worden. De sterkte van de stroming doorheen de dijk, de diepte ten opzichte van het maaiveld en de aanwezigheid van storende factoren zijn parameters die het resultaat van de meting zullen beïnvloeden. Desondanks kan deze methode een aanvulling vormen voor het controleren van stroming doorheen de dijk indien een vermoeden van microinstabiliteit bestaat en/of indien visuele of andere inspecties onvoldoende sluitend zijn.

Fauchard & Mériaux (2007) bespreken deze methode niet in detail, maar raden aan om deze methode in te zetten om dijken te controleren tijdens hoogwatersituaties of overstromingen, of in de periode na overstromingen.

## 3.2. Elektromagnetische methodes

### 3.2.1. Grondradar

#### i. Principe en uitvoering

De grondradar is een hoge-resolutie geofysische beeldvormingstechniek die gebaseerd is op het uitzenden en ontvangen van radargolven (hoogfrequente elektromagnetische golven: MHz - GHz). De grondradar is een niet-destructieve techniek die gebruikt wordt voor diverse geologische en technische doeleinden, waaronder het opsporen en/of in beeld brengen van bodemlagen, watertafel, ondiepe geomorfologie, archeologische sites, nutsleidingen, asfalt- en betoncontrole, holtes.

De grondradar bestaat uit twee radarantennes (een zender en een ontvanger). De zender stuurt een korte radarimpuls uit in de grond terwijl de ontvanger het ontvangen signaal opneemt en doorstuurt naar de controle-eenheid. Deze eenheid zorgt voor de digitalisatie en het doorsturen naar de acquisitie-eenheid (een veldcomputer).

Metingen met laag- tot middenfrequente grondradars worden gebruikt voor het in beeld brengen van objecten en laagstructuren in de ondergrond. Toepassing op dijken hebben als doel de structuur van het dijklichaam in beeld te brengen.

Het voortschrijden van de radargolven in een medium hangt af van de elektrische en diëlektrische eigenschappen. De snelheid waarmee een radargolf doorheen een medium gaat hangt af van de relatieve magnetische permeabiliteit (ongeveer gelijk aan 1 in niet-magnetische media) en de relatieve diëlektrische permittiviteit (diëlektrische constante). De diëlektrische constante bedraagt in droge zandige bodems ongeveer 4, terwijl dit in natte kleiige bodems 10 tot 30 bedraagt. Het watergehalte is de belangrijkste factor hierin, aangezien de diëlektrische constante van zoet water ongeveer 80 bedraagt. De snelheden van de signalen liggen typisch tussen  $0.06$  en  $0.175 \text{ m}\cdot\text{ns}^{-1}$ .

Indien een radarsignaal over het grensvlak van twee materialen met verschillende diëlektrische constante gaat, zal een deel van de energie teruggekaatst worden. De penetratiediepte van de radarsignalen hangt sterk af van de gebruikte frequentie en de elektrische conductiviteit van de bodem. Grondradar antennes werken op diverse frequenties, gaande van 10 MHz tot meerdere GHz. Zoals bij alle geofysische technieken zullen hoogfrequente signalen minder diep penetreren dan laag-frequente signalen. Media met een hoge conductiviteit zullen het radarsignaal ook sneller atteneren dan media met een lage conductiviteit. In laag-conductieve media (bv. droog zand) zullen laagfrequente antennes (50 of 100 MHz) een penetratie tot verscheidene tientallen meters bereiken, terwijl hoogfrequente antennes (bv. 500 MHz) tot een paar meter diep reiken. In hoog-conductieve media (nat kleiig zand) zullen deze meetdieptes afnemen tot een fractie daarvan.

Een van de grote beperkingen van de grondradar houdt dan ook verband met de beperkte penetratie in kleihoudende en/of natte bodems.



Figuur 9: GPR opstelling 200 Mhz, niet-afgeschermd antennes.



Figuur 10: 2.3 GHz GPR voor asfaltcontrole.

Er zijn een groot aantal types van grondradar-antennes beschikbaar die elk hun optimale toepassingsveld hebben in functie van resolutie en penetratie:

- Laag- tot middenfrequent: 50, 100, 250, 500 MHz
- Hoogfrequent: 1 GHz, 2.3 GHz

De laagfrequente antennes bestaan bovendien als afgeschermd en niet-afgeschermd types. De afscherming houdt in dat het radarsignaal enkel in neerwaartse richting (dus in de bodem) wordt uitgestraald en bijgevolg kan ingezet worden in gebieden waar zijwaartse of opwaartse invloed (bv muren, lantaarnpalen, ...) bestaan. De niet-afgeschermd antennes ontvangen reflecties van alle zijden rondom de dipoolantennes, en kunnen dus enkel in open terrein worden ingezet. Ze hebben als voordeel dat ze breedbandiger zijn dan afgeschermd antennes en minder resonantie vertonen.

## ii. Meetresultaten

### *Laag- en middenfrequente grondradar*

Metingen met laag- tot middenfrequente grondradars zijn uitgevoerd te Hingene, Walem en Vlassenbroek. Op de eerste twee sites zijn afgeschermd antennes gebruikt, te Vlassenbroek niet-afgeschermd. Frequenties varieerden tussen 100 en 500 MHz.

Te Walem is de zone ter hoogte van een scheur in het asfalt met verschillende lengte- en dwarsprofielen in beeld gebracht. De metingen met 250 en 500 MHz tonen er een beperkte penetratie omwille van de kleiige kern van de dijk. Er worden 2 tot 3 eenheden/lagen in beeld gebracht: de asfaltlaag van het jaagpad, een vermoedelijk zandige laag die de ophoging is boven op de oude dijk of deel van de aanleg van de weg, en daaronder een zone zonder penetratie die vermoedelijk de oude kleidijk voorstelt. Ter hoogte van de scheur ligt de basis van de tweede laag dieper aan landzijde dan aan rivierzijde, wat inderdaad te maken kan hebben met de afschuiving zelf. Op dwarsprofielen over de flanken van de dijk kan niets worden waargenomen door onmiddellijk attenuatie van het signaal in de kleiige afdeklaag.

Te Vlassenbroek zijn niet-afgeschermd antennes ingezet. Er is absoluut geen informatie over de dijkstructuur verkregen, behalve de dikte van de asfalt (+ stabilisatielaag), met beperkte resolutie, voor de opnames op het asfalt. Het vermoeden bestaat dat de zanden gebruikt voor de aanleg van de dijk kleiiger zijn dan verwacht. Profielen naast de weg leveren geen interpreteerbare resultaten. De kleiige afdeklaag van de dijk atteneert hier onmiddellijk alle energie.

De metingen te Hingene vertonen eveneens weinig penetratie en de enige interpreteerbare reflector is de basis van de asfalt bedekking op het jaagpad.

### *Hoogfrequente grondradar*

De metingen op dijkflanken die bedekt zijn door teelaarde worden ernstig verhinderd door de hoge elektrische conductiviteit van deze bodemlaag: het vermindert de penetratiediepte en de amplitude van de gereflecteerde signalen. In de praktijk wordt in de meeste gevallen de basis van de asfaltlaag gedetecteerd.

De oneffenheid van de dijkflanken (bv. te Lippenbroek) zorgt voor een slecht contact tussen antenne en bodem. Om een continu beeld te krijgen is echter een vlakke, egale bodem en dus een goede koppeling tussen antenne en ondergrond nodig. De slechte horizontale signaalcontinuïteit wordt enigszins gecompenseerd door *static correction* tijdens de dataverwerking, maar onvoldoende om structuurdefecten (of afwezige bodem) alsdusdanig te kunnen discrimineren op basis van de signalen binnenin pakketten (m.a.w. de interne signaalstructuur van een laag is te chaotisch of heterogeen om dit als indicator te gebruiken voor de kwaliteit van de laag). Waar de bodem relatief glad is (bv. te Lier) is de penetratie en signaalcontinuïteit van reflecties goed. Het bestaan van structuurdefecten is op basis van de ingemeten profielen niet bewezen. Holtes moeten in principe aantoonbaar zijn met deze techniek, maar zijn niet aangetoond in de opnames.

De metingen op dijkflanken aan rivierzijde (Benedenschelde) leveren helemaal geen resultaten aangezien alle signaal geattenuëerd wordt ten gevolge van de hoge conductiviteit van het zoute water op, in en/of net onder het asfalt. Grondradar is onbruikbaar in deze omstandigheden.

Over het algemeen levert de 1 GHz radarantenne de beste penetratie en kan de asfaltbasis goed gevolgd worden. Diktevariaties zijn met deze antenne meetbaar. De 2.3 GHz radarantenne levert de beste resolutie maar presteert enkel goed indien de bodemlaag afwezig is.

### iii. Betrouwbaarheid van de methode

De betrouwbaarheid van de methode kan opgesplitst worden per type meting.

#### *Laag- tot middenfrequente grondradar*

De signaalpenetratie in dijken is zeer problematisch door het voorkomen van klei in de gebruikte zanden, de afdeklaag en de oude dijk kern: klei absorbeert de signalen. Over het algemeen is de enige informatie die uit de metingen voortspruit de dikte van de straatbedekking. Voor controle van de asfaltlaag is de hoogfrequente radar echter beter geschikt (hogere resolutie).

Om die reden kan de laag- tot middenfrequente grondradar als niet inzetbaar bestempeld worden. Voor de controle van dijkstabiliteit of het in beeld brengen van de dijkstructuur levert deze methode geen of amper bruikbare informatie op. Fauchard & Mérieux (2007) bestempelen de grondradar eveneens als weinig geschikt voor de meeste dijkonderzoeken.

#### *Hoogfrequente grondradar*

De beste resultaten van de grondradar metingen worden behaald met betrekking tot de meting van de dikte van de asfalt- en bodembedekking. Het opsporen van minder dikke zones in het asfalt is zeker haalbaar met deze methode. Zelfs in zones met een dunne bodembedekking blijft de asfaltbasis meetbaar. Bijgevolg kan de 1GHz antenne aangeduid worden als meest geschikte voor het bepalen van de dikte van asfalt- en bodemlaag.

Het gebruik van asfaltdikte in combinatie met andere geotechnische meetmethoden (bv. de valproef waarbij de buigzaamheid of stijfheid van het asfalt wordt bekomen; laboratorium-proeven op kernstalen om vermoeiingsparameters te bepalen; geotechnische parameters van de ondergrond) kan effectief leiden tot een evaluatie van de veiligheid van de dijkbekleding. De dikte van de asfalt is een belangrijke parameter voor de gehele dijkstabiliteit.

## 3.2.2. Frequentiedomein EM

### i. Principe en uitvoering

Frequentiedomein elektromagnetisme (FDEM) is een inductieve techniek die wordt ingezet voor het detecteren van de elektrische bodemconductiviteit en magnetiseerbare objecten.

Het principe van de methode berust op het induceren van (ondergrondse) elektrische stromen onder invloed van een aangelegd elektromagnetisch veld (het 'primair' veld). De ondergrondse elektrische stromen wekken een secundair elektromagnetisch veld op; de som van het primair en secundair veld wordt gemeten. Het opwekken en meten van de velden gebeurt met spoelvormige antennes. Het secundair veld wordt ontbonden in een *in fase* component (in fase met het primair veld) en een component die 90° uit fase is, de quadratuur.



Figuur 11: EM31 meting op dijkflank.

De quadratuur verhoudt zich tot de bodemconductiviteit en gaat op bij lage inductiewaarden. Door metingen langs een traject of over een oppervlakte te maken kan een profiel of kaart van de schijnbare bodemconductiviteit opgesteld worden.

De methode is gevoelig voor geleidende en/of magnetiseerbare omgevingsobjecten.

De diepte waarover de meting wordt uitgevoerd hangt af van de frequentie van het aangelegde EM veld, de antenneseparatie en de oriëntatie van de antennes (het EM veld kan verticaal of horizontaal aangelegd worden).

Twee voorbeelden van toestellen die inzetbaar zijn, zijn de Geonics EM31 en EM34. Deze hebben volgende karakteristieken.

Tabel 2: Karakteristieken van de EM31 en EM34 frequentiedomein elektromagnetometers

Instrument	Frequentie	Oriëntatie (van de EM dipool)	Antenneseparatie	Dieptebereik
EM31	9800 Hz	Horizontaal	3.66 m	3.7 m
		Verticaal		5.5 m
EM34	6400 Hz	Horizontaal	10.0 m	10
		Verticaal		15
	1600 Hz	Horizontaal	20.0 m	20
		Verticaal		30
	400 Hz	Horizontaal	40.0 m	40
		Verticaal		60

### ii. Meetresultaten

De EM31 is ingezet geweest te Tielrode om een zone in de dijk op te sporen waar de opbouw op korte afstand sterk verandert als gevolg van de opvulling van een bres. De meting was succesvol en werd opgevolgd door een resistiviteitstomografie om de structuur van de dijk in die zone in beeld te brengen. Voor de bespreking van de meetresultaten wordt verwezen naar rapport 08D\_007/EG/GP/TIELR/REP001.

Op andere plaatsen heeft de EM31 telkens een goede aanduiding gegeven over het type materiaal dat in de ondiepe bodem aanwezig was. Het meetinstrument is dus goed inzetbaar om het type bodemmateriaal te identificeren en veranderingen in de ondiepe structuur op te sporen.

De EM34 is niet ingezet geweest binnen dit project. Eerdere ervaringen hebben aangetoond dat de gevoeligheid van de EM34 laag was om veranderingen in de dijkstructuur duidelijk op te sporen.

### iii. Correlatie FDEM en resistiviteitstomografie

In de diverse rapporten van de locaties waar de EM31 en resistiviteitstomografie werden ingezet, is telkens aandacht gevestigd op de goede overeenkomsten tussen de ondiepe delen van de resistiviteitstomografie en het signaal van de EM31.

Figuur 12 illustreert een meting van EM31, EM34 (in horizontale dipoolmodus) en een glijdend gemiddelde van de gemiddelde resistiviteit (over een diepte van 6 m) op basis van resistiviteitstomografie. Alle waarden zijn genormaliseerd tussen 0 en 1.

Uit de grafiek blijkt dat op grote schaal de EM34 en de EM31 een vergelijkbaar signaal tonen maar dat deze laatste meer lokale kleine anomalieën vertoont die niet aanwezig zijn bij EM34 metingen. Anderzijds zijn de grote anomalieën veroorzaakt door omgevingsstructuren (leidingen, sluisen, ...) veel scherper en duidelijker afgelijnd op de EM31 data dan op de EM34 data wat voordelen levert voor de interpretatie van de gegevens.

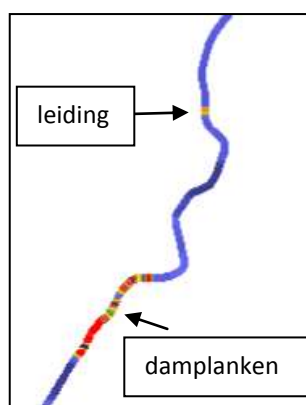
De grafiek toont ook aan dat de grote trends in de tomografische en elektromagnetische methode elkaar goed volgen alhoewel een aantal resistiviteitsanomalieën niet voorkomen in de elektromagnetische meetwaarden (bv. ter hoogte van afstand 1500-1600). Dit kan te wijten zijn aan de meting zelf (bv. een slecht contact tussen meetelektroden en bodem bij de resistiviteitstomografie) maar ook een fout in de berekening van het dieptegemiddelde omdat geen rekening werd gehouden met de diepteafhankelijkheid van de meting.



Figuur 12: Genormaliseerde vergelijking van EM34 (horizontale dipool, groen), EM31 (oranje) en de gemiddelde resistiviteit van de bovenste laag (6 m) van een resistiviteitstomogram te Berlare (blauw).

#### iv. Betrouwbaarheid

In het kader van deze studie is enkel de EM31 in verticale modus ingezet. Eerdere ervaringen hadden aangetoond dat de gevoeligheid van de EM34 te laag was om veranderingen in de dijkstructuur duidelijk op te sporen. De efficiëntie van de EM34 is ook lager ten opzichte van de EM31. Metingen met EM31 leveren quasi continue resultaten op met nauwkeurige positionering (GPS met RTK correctie) terwijl de EM34 een eerder discrete opname oplevert. Bovendien geeft de EM31 ook de magnitude van de infase component als resultaat wat kan gebruikt worden om magnetiseerbare objecten in de ondergrond op te sporen (leidingen, damplanken; Figuur 13). Tenslotte heeft de EM31 in verticale modus een dieptebereik van iets minder dan 6 meter, wat overeenkomt met de schaal die interessant is voor dijkstudies. De proefmetingen tonen aan dat het instrument nauwkeurig zones opspoort met veranderende opbouw en een indicatie geeft over het type materiaal. De overeenstemming tussen EM31 en resistiviteitsmetingen op de verschillende proeflocaties ondersteunt de goede betrouwbaarheid van de EM31 meetwaarden. De belangrijkste beperking houdt in dat metalen structuren in de omgeving (op een afstand van minder dan 6 m) de meting verstoren.



Figuur 13: Voorbeeld van de infase component meetwaarden langs een dijksegment langs de Schelde gemeten (te Vlassenbroek). De rode kleuren wijzen hier enerzijds op de aanwezigheid van damplanken en anderzijds op de aanwezigheid van een leiding die de dijk kruist.



### 3.2.1. Capacitief gekoppelde resistiviteitsmeter

#### i. Principe en uitvoering

Metingen met een capacitief gekoppelde bodemresistiviteitsmeter hebben als doel de schijnbare resistiviteit van de ondergrond op te meten. Inversie van deze gegevens leidt tot een resistiviteitsmodel van de bodem. Het resultaat van deze meting is in principe equivalent met dat van resistiviteitstomografie.

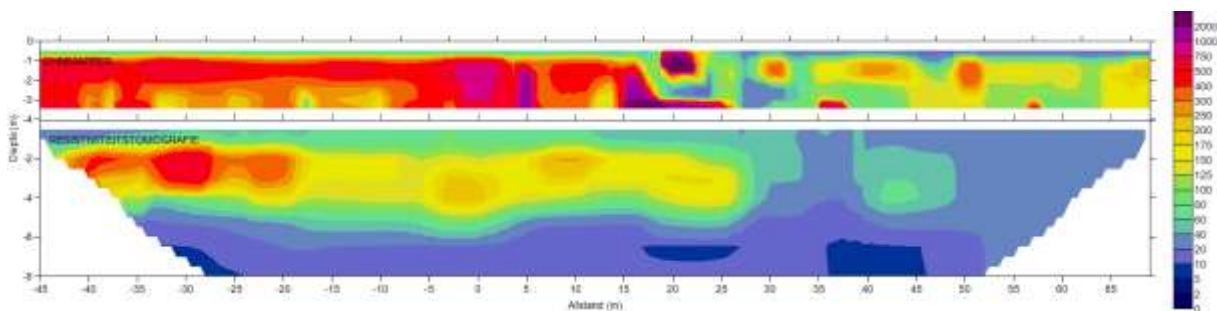
Een capacitief gekoppelde bodemresistiviteitsmeter zoals de Geometrics OhmMapper bestaat uit een zender en ontvanger die elk als dipool fungeren en dus samen een dipool-dipool opstelling vormen. Een wisselstroom legt een alternerende spanning aan op de zenddipool; de resulterende wisselspanning wordt gemeten aan de ontvangstdipool. De meting gebeurt terwijl de meetopstelling over de grond wordt gesleept (door een persoon of een voertuig). Door het herhalen van de meting met verschillende spatiëring tussen zend- en ontvangstdipool kan na inversie van de gegevens een bodemmodel van de resistiviteit worden bekomen. De methode levert in principe een gelijkaardig resultaat op als resistiviteitstomografie maar kan vele malen sneller worden uitgevoerd. De methode kan toegepast worden op plaatsen waar geen rechtstreeks contact met de bodem mogelijk is, zoals op dijken bedekt met asfalt. Een beperking is dat bij sterk geleidende ondergrond, zoals kleien, de signaalpenetratie verhinderd wordt.



Figuur 14: OhmMapper toestel.

#### ii. Meetresultaten

Te Hingene is de Geometrics OhmMapper ingezet; in het rapport worden de gegevens als pseudosecties (ruwe data) weergegeven. Op basis daarvan kan een goed onderscheid gemaakt worden tussen zones met lage en hoge schijnbare resistiviteit (of geïnterpreteerd worden als zandige en kleiige bodem). Bovendien blijken de gegevens, die een beeld geven van de eerste paar meter onder het oppervlak, qua structuur goed overeen te komen met de resistiviteitstomografie. Op Figuur 15 wordt een segment van de geïnverteerde data weergegeven, in combinatie met een resistiviteitstomogram. Hieruit blijkt dat de ohmMapper een minder diep bereik heeft (alhoewel dit ook afhangt van de maximale spatiëring tussen de dipolen) maar een hogere resolutie. De toplaag met gemiddelde resistiviteit wordt scherper en dunner weergegeven en lokale hoog-resistieve anomalieën worden eveneens scherper weergegeven. Het contrast tussen de twee profielhelften, met hoge tegenover gemiddelde tot lage resistiviteit, is in beide profielen duidelijk aanwezig.



Figuur 15: Vergelijking van resistiviteitsbeeld op basis van OhmMapper en klassieke resistiviteitstomografie.

#### iii. Betrouwbaarheid van de methode

De OhmMapper is enkel te Hingene ingezet geweest, dus op basis van die metingen alleen kan een algemene betrouwbaarheid van de methode moeilijk geëvalueerd worden. Echter, de kwalitatieve overeenkomsten met

de resistiviteitsmethode, die eerder als betrouwbaar werd aangeduid, geeft een indicatie dat voor toepassingen die een ondiepe beeldvorming vragen, een capacitief gekoppeld resistiviteitssysteem als de OhmMapper inzetbaar is. Voor het in beeld brengen van de volledige dijkstructuur lijkt de methode beperkt inzetbaar net omwille van beperking in dieptebereik, ondanks de hoge operationele efficiëntie. Garman & Purcell (2004) geven aan dat de methode kan ingezet worden om ondiepe kleien op te sporen. Ze duiden echter ook op de beperking dat de dikte van een geleidende kleilaag niet opgespoord wordt als ze dikker is dan 3 meter, of dieper voorkomt dan ongeveer 9 meter. Fauchard & Mérieaux (2007) geven aan dat de methode inderdaad snel, maar enkel voor oppervlakkige identificatie van materialen kan ingezet worden. Bovendien bereikten zij slechte overeenkomsten met resistiviteitstomografische resultaten. De toepassing op dijken waarbij de bodem bedekt is met asfalt kan echter een alternatief vormen voor resistiviteitstomografie.

### 3.3. Seismische methodes (op land)

#### 3.3.1. Refractie met P-golven

##### i. Principe en uitvoering

Refractie seismiek heeft als doel informatie op te leveren over de seismische voortplantingssnelheid in de bodem.

Refractie seismiek is gebaseerd op het principe van de kritische refractie van seismische golven in de ondergrond. Door de tijd te registreren die nodig is voor een gerefracteerde seismische golf om van de seismische bron een gefoon op bepaalde afstand te bereiken, kan men de snelheid van de seismische golf in de ondergrond bepalen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de snelheid toeneemt met de diepte.

P-golven worden opgewekt door bv. met een zware hamer te slaan op een kunststof slagplaat. De plaat zorgt voor een goede overdracht van de energie in de bodem. Per bronpunt worden meerdere slagen uitgevoerd; de resulterende signalen worden gesommeerd wat de *signal to noise ratio* verhoogt.

De verwerking bestaat uit het selecteren van de eerste aankomst van de p-golven voor elke gefoon; voor zoverre het signaal nog detecteerbaar is. Na herhaling voor de verschillende bronpunten wordt een groep van tijd-afstandscurves bekomen. De helling van deze curves staat in verhouding tot de snelheid van de golf in de bodem. De combinatie van de vele bron-en meetpunten zorgt voor een uitgebreide bedekking van het meetprofiel. Door numerische inversie wordt een P-golf snelheidstomogram van de ondergrond bekomen.

##### ii. Meetresultaten

Over het algemeen worden op de seismische profielen twee lagen geobserveerd. Een toplaag met lage snelheid (200-400 m/s) en een tweede laag met een hogere snelheid (400 m/s - > 2000 m/s). Het contrast tussen top- en diepere laag is echter minder uitgesproken op het snelheidsbeeld dan op het resistiviteitstomogram. Het resistiviteitstomogram brengt duidelijk de overgangen in dijkstructuur in beeld en zijn goed te correleren met de geotechnische gegevens. Voor het snelheidstomogram is dit echter minder het geval. Nochtans is in het snelheidsbeeld toch steeds een duidelijk verschil observeerbaar tussen dijksegmenten met een verschillende opbouw.

De geïnverteerde snelheden in de diepte zijn lager dan verwacht. Ter hoogte van de grondwatertafel zouden de snelheden moeten oplopen tot 1500 m/s. Onder andere in de seismische profielen van de dijk tussen Fort



Figuur 16: Uitrusting voor het opwekken van P-golven.



Filips en Noord Kasteel wordt dit niet waargenomen. Dit is in tegenspraak met de ruwe data waar deze hoge snelheden wel aanwezig. Door de weinige datapunten die wijzen op de hogere snelheid, levert dit in het snelheidsmodel waarschijnlijk te weinig afwijking van de gemeten ten opzichte van de berekende snelheden op.

### iii. Bruikbaarheid

Refractie seismiek van P-golven kan toegepast worden als een aanvullende techniek op andere (niet-destructieve) metingen maar is onvoldoende succesvol geweest op dijken om als algemeen bruikbaar aan te duiden. Het bekomen beeld van de ondergrond is minder gedetailleerd dan een weerstandstomogram en moeilijker correleerbaar met geotechnische data, maar de snelheidsstructuur kan indicatieve informatie verschaffen over de bulk- en /of schuifmoduli en densiteit van de dijklichamen en ondergrond, en de diepte van de grondwatertafel.

### 3.3.2. Refractie met S-golven

#### i. Principe en uitvoering

Het principe is in gelijk aan dat van P-golf refractie seismiek (zie hierboven). Enkel worden hier S-golven (transversale golven) gegenereerd. Deze S-golven hebben een lagere snelheid dan P-golven en zijn transversaal gepolariseerd. De verwerking is grotendeels gelijkaardig.

S-golven kunnen worden opgewekt door met een zware hamer te slaan op de zijkant van een slagblok die gekoppeld is aan de grond (bv. door pinnen). Door te slaan op het blok ontstaat een schuifbeweging in de bodem. Deze energie plant zich voor als een horizontaal gepolariseerde S-golf (SH). Per bronpunt worden meerdere slagen uitgevoerd; de resulterende signalen worden gesommeerd zodat de *signal to noise ratio* verhoogt. Per bronpunt werd de opname herhaald in twee richtingen. Door aan de andere kant van de blok te slaan ontstaan S-golven met een

tegenovergestelde polariteit. Op deze manier kan men tijdens de verwerking S-golven onderscheiden van P-golven die dezelfde polariteit behouden.

#### ii. Meetresultaten en bruikbaarheid

De S-golven refractie is over het algemeen weinig succesvol gebleken. De opwekking en registratie van S-golven is problematisch vergeleken met het opwekken van P-golven. Verschillende factoren spelen hierin mee:

- In Vlassenbroek was de asfaltlaag op de kruin van de dijk een probleem. Hier treed het fenomeen van *mode conversion* op. S-golven worden omgezet tot P-golven op het moment dat ze invallen op een oppervlak dat een hoek vormt verschillend van  $90^\circ$  van de polarisatie richting van de golven. Dit wil zeggen dat de energie van de S-golf wordt overgezet naar de bestrating en verder reist als P-golf, en dus met de snelheid van een P-golf. Langsheen het traject verlaat de P-golf opnieuw de bestrating waarbij opnieuw SH-golven worden gevormd. Het resultaat hiervan is dat de snelheid van de aankomende golven in de grootte-orde van de snelheid van P-golven ligt. Hierdoor wordt het moeilijk, tot onmogelijk om de resultaten te interpreteren.
- Op de dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel was het de hoeveelheid stenen in de ondergrond die op het lage dijkgedeelte voor problemen zorgde. Door de grote hoeveelheid stenen was het contact



Figuur 17: Opwekken van S-golven.



Figuur 18: Meetopstelling van geofonen.

van het slagblok met de ondergrond te klein. Dit had als gevolg dat te weinig energie werd overgedragen naar de bodem en bijgevolg de interpretatie onmogelijk was. Op de hoge dijk was het wel mogelijk de S-golf data te interpreteren.

- Te Hingene is ook maar in beperkte mate een tomografisch beeld van de ondergrond bekomen.

Over het algemeen mag aangenomen worden dat bij goed contact met de bodem en bij afwezigheid van mogelijk storende structuren in de omgeving, die kunnen leiden tot conversie van S-golven tot P-golven, er snelheidsinformatie van de oppervlakkige lagen wordt bekomen. Echter, uit bovenstaande feiten blijkt dat het opwekken van S-golven moeilijk is en bijgevolg de interpretatie van de data dikwijls problematisch wordt.

Een belangrijke beperking van refractiemetingen die nog dient aangehaald te worden is dat snelheidsverlagingen met toenemende diepte niet in beeld kunnen gebracht worden. Dit is een probleem in laaggelegen gebieden waar veen-of andere ondergeconsolideerde lagen kunnen voorkomen.

### 3.3.3. MASW

#### i. Principe en uitvoering

De meerkanaalsanalyse van oppervlaktegolven (*multichannel analysis of surface waves, MASW*) is een seismische techniek waarbij spectrale snelheidsanalyse leidt tot S-golfsnelheden van de ondergrond die kunnen gebruikt worden voor het in kaart brengen van horizontale en verticale variaties in materiaaleigenschappen. De materiaaleigenschappen in kwestie zijn de schuifmodulus ( $\mu \sim \rho \cdot V_s^2$ ) en de elasticiteitsmodulus ( $E \sim V_s^2$ , (en in mindere mate de poisson verhouding)) en na omrekening de bulkmodulus.

De S-golfsnelheid neemt toe naarmate de schuifweerstand van de bodem toeneemt. De voortplanting van oppervlaktegolven is dispersief (in tegenstelling tot P- en S-golven), wat betekent dat de snelheid van de golf frequentieafhankelijk is. Hoog-frequente golven planten zich trager voort dan laagfrequente golven omdat hoogfrequente golven minder diepe delen (bijgevolg minder compacte en minder rigide) van de bodem exciteren. Per frequentie kan dus een fasesnelheid toegekend worden en bovendien kan die snelheid gekoppeld worden aan een diepte; dit levert de dispersiecurve op. De fasesnelheid van een oppervlaktegolf is een functie van elastische parameters, en kan uitgedrukt worden in functie van de P- en S-golfsnelheid, de densiteit en Poisson verhouding van de bodem. De S-golfsnelheid heeft echter de hoogste graad in deze vergelijking. Door numerieke inversie van de dispersiecurve kan een S-golven dieptemodel opgesteld worden. Afhankelijk van de implementatie van het inversiealgoritme kunnen constante of variërende waarden ingegeven worden voor de andere belangrijkste parameters, of ze kunnen mee in de inversie opgenomen worden.

In deze studie is de methode verkennend getest geworden. De opname is gelijkaardig aan deze van P-golven refractie (zie hierboven) maar de opnametijd is langer zodat voldoende oppervlaktegolven ontvangen worden. Er werd gebruik gemaakt van 14 Hz geofonen wat als gevolg heeft dat de lage frequentiecomponenten van de oppervlaktegolven minder gevoelig in beeld werden gebracht, wat er toe leidt dat het dieptebereik van de methode in deze opstelling beperkt is. Bovendien werd enkel 1D-MASW toegepast. De methode kan in 2D of 3D uitgebreid worden. Een belangrijk voordeel van MASW ten opzichte van S-golven refractie is dat snelheidsinversies wel gemeten kunnen worden. Immers, lage-snelheidszones aan de basis of onder dijken kunnen geïnterpreteerd worden als slappe kleiige lagen; dit heeft belangrijke implicaties voor de stabiliteit van dijken.

#### ii. Resultaten

1D-MASW opnames werden uitgevoerd op de dijk tussen Fort Filips en Noord Kasteel en te Vlassenbroek. De resultaten zijn besproken in de rapporten 10D\_001/LA/FF/REP002 en 10D\_001/LA/VLA/REP002.

### iii. Betrouwbaarheid

Deze eerste proeven van de MASW methode tonen aan dat er een matige tot redelijke overeenstemming is tussen de resulterende S-golf profielen en de geotechnische informatie aanwezig via de sonderingen. De beperkte databeschikbaarheid stemt echter tot voorzichtigheid want de MASW verwerking is complex (complexer dan de opname van de signalen) en bevat 2 aspecten die kritiek zijn voor het uiteindelijke resultaat:

- Het picken van de dispersiecurve. De dispersiecurve vormt de enige invoerdata voor de numerieke inversie. De kwaliteit van de dispersieanalyse zal dus rechtstreeks in verband staan met de kwaliteit van de inversie en dus het resulterende bodemmodel. Hoe beter de kwaliteit van de frequentie-fasesnelheidsplot, hoe gemakkelijker en ondubbelzinniger de selectie van de dispersiecurve kan gebeuren.

- De numerische inversie zelf. De dispersiecurve is een functie van S-golfsnelheden op verschillende dieptes en is hiermee gerelateerd aan diverse andere parameters. Afhankelijk van hoe het model opgebouwd wordt (bv. dichtheid, P-golfsnelheid) en of verschillende parameters tegelijk worden geïnverteerd, kunnen de resultaten dus variëren. In elk geval is er niet één unieke oplossing. Van groot belang is dat de modelleringsroutine zelf niet beïnvloed wordt door convergentie naar lokale foutminima (lokale minima in de RMSE). De eerste modellen gebruikten een initieel model dat door het algoritme geoptimaliseerd werd. De kwaliteit van het initieel model was dus deels determinerend voor de uiteindelijke oplossing. Moderne inversieroutines maken echter gebruik van zoekalgoritmes of genetische algoritmes waarbij wordt uitgegaan van een grote verzameling initiële modellen. Dergelijke modellen leveren vaak meer dan 1 bodemmodel als resultaat op. Na verdere calibratie, selectie of interpretatie hebben de resultaten echter een hogere betrouwbaarheid.

1D-MASW is op beperkte schaal getest geworden binnen deze studie en heeft voor deze site S-golf snelheidsprofielen opgeleverd die de geotechnische informatie in sommige gevallen weerspiegelen. Deze methode blijkt in elk geval beter in staat om S-golf snelheidsinformatie te genereren dan met S-golf refractie. Bovendien is de meetprocedure zeer robust. Een uitbreiding naar 2D-MASW kan voor geotechnische dijkstudies overwogen worden, maar dit dient uitgebreid getest te worden. Een nadeel aan deze methode is het belang van de gekozen inversieprocedure. De ontwikkelingen op dit vlak zijn echter veelbelovend.

#### 3.3.4. Geotechnische moduli

In de tekst wordt het verband tussen seismische snelheidsgegevens en geotechnische grondkarakteristieken (de elastische vervormingsmoduli). De wiskundige verbanden zijn:

- P-golf snelheid ( $V_p$ ), Bulk Modulus ( $K$ ), Schuifmodulus ( $G$ ), Dichtheid ( $\rho$ )

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

- S-golf snelheid ( $V_s$ ), Schuifmodulus ( $G$ ), Dichtheid ( $\rho$ )

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

- Young's modulus ( $E$ ), Schuifmodulus ( $G$ ), Poisson verhouding ( $\nu$ )

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Voor de meeste toepassing is de schuifmodulus de belangrijkste, omdat deze een maat voor de stijfheid van de bodem is.

De bepaling van deze modulus met seismische methodes (dynamische bepaling) leidt tot een (veel) hogere waarde dan wat blijkt uit laboratoriumproeven (statische bepaling). De reden hiervoor is dat de moduli afhankelijk zijn van de grootte van de vervorming die de materialen ondergaan. Zowel voor klei, zand en grind neemt de waarde van de moduli af met toenemende vervorming. Bij seismische metingen zijn de vervormingen zeer klein ( $\sim 10^{-6}$  %) en zullen de moduli dus maximaal zijn. Bij toepassing in geotechnische berekeningen zijn deze waarden echter een overschatting van de effectieve moduli, bv. bij de berekening van zettingen onder een constructie.

Hiertegenover staat dat de bepaling van de schuifweerstand met laboproeven of in-situ proeven (bv. de *pressuremeter* test) de waarde voor geotechnische doeleinden kan onderschatten omdat de geïnduceerde vervormingen groter zijn dan deze die optreden onder belasting (Price & Defreitas, 2009). Bovendien zijn labotesten beïnvloedbaar door verstoring bij de monsternamen en/of -preparatie. In sommige bodemsoorten zijn betrouwbare samples bovendien niet te bekomen. Een ander nadeel van laboproeven is dat het staal waarop de test wordt uitgevoerd een beperkte representatie is van de volledige bodemmassa.

### 3.4. Akoestische methodes (op water)

#### 3.4.1. Side scan sonar

##### i. Principe en uitvoering

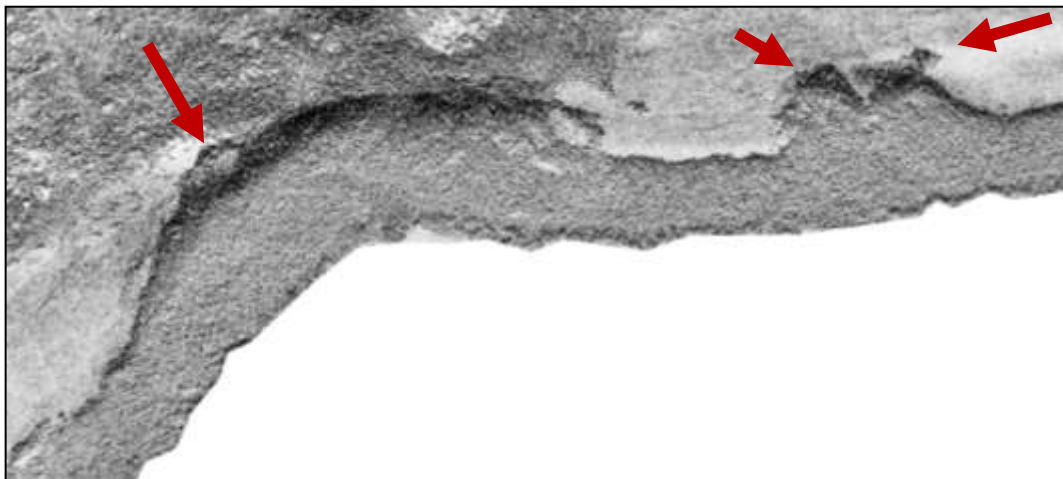
Side Scan Sonar (SSS) wordt gebruikt om hoge resolutie beelden te maken van rivierbodems en oevers met behulp van akoestische energie. Het is een snelle en efficiënte manier om de toestand van onderwatertaluds na te gaan.

De SSS bestaat uit een verwerkingseenheid, een datakabel en een sonarvis die voorzien is van twee transducers (akoestische bron). Deze transducers zenden een akoestische bundel met een bepaalde range uit dwars op de vaarrichting van het schip. Deze bundel reflecteert op de rivierbodem en wordt weer opgevangen door de sonar. Afhankelijk van de samenstelling en textuur van het bodemmateriaal zal veel of weinig akoestische energie gereflecteerd worden. Aan de hand van de reflectie van de akoestische bundel wordt per gevaren lijn een beeld van de bodem opgebouwd. De SSS-beelden van de verschillende lijnen worden samengevoegd in een geo-gerefereerde mozaïek, waardoor een continu beeld van de rivierbodem wordt bekomen. Op basis van de hoeveelheid weerkaatste energie (backscatter), textuur en aanwezigheid van bodemstructuren wordt een interpretatie gemaakt van de toestand van onderwatertaluds.

De *range* en de resolutie van een SSS hangt af van de gebruikte frequentie. Hoe hoger de frequentie hoe kleiner de range, maar hoe groter de resolutie. Systemen met een resolutie tussen 400 en 600 KHz worden gebruikt voor een gedetailleerde beschrijving van de bodemmorfologie. De aanwezigheid van luchtballen in het water zal de datakwaliteit sterk verminderen. Hoge turbiditeit zal de resolutie en dus de datakwaliteit verminderen. SSS-surveys geven geen informatie over de interne opbouw van dijken of over processen die zich afspelen aan de landzijde van dijken.

##### ii. Meetresultaten

Op basis van de opgenomen SSS-beelden te Hingene werden vijf facies van de rivierbodem beschreven. De eerste 4 facies beschrijven een overgang van gebieden met weinig stroming en sedimentatie van fijn materiaal tot gebieden met actieve uitschuring van de rivierbodem en dijkwand. Het vijfde facies is de taludbescherming/steenstortingen. Langs een groot stuk van de proefsectie te Hingene is de dijkbekleding zichtbaar tot aan de teen van het talud. Dit wijst op de aanwezigheid van sterke stromingen tot tegen de dijkbekleding. Slechts op enkele plaatsen komen zachtere sedimenten voor bovenop de steenstortingen. Drie zones werden gedetecteerd waar de dijkbekleding/steenstortingen duidelijk afgegeleden zijn. Er komt een grote zone voor met actieve uitschuring. De sterk verstoorde rivierbodem op deze plaats bestaat uit grove sedimenten en reikt tot aan de teen van de talud.



Figuur 19: Voorbeeld van afgeschoven steenbestoringen (rode pijlen).

### iii. Betrouwbaarheid

De opname van hoge-resolutie beelden van de morfologie van de rivierbodem en taluds laat toe plaatsen aan te duiden waar sedimentatie optreedt of waar de rivier een sterk schurende werking heeft op het talud. Het belangrijkste is echter dat ook zones kunnen aangeduid worden waar door instabiliteiten afglijdingen voorkomen van de dijkbekleding. Deze waarnemingen zijn belangrijk om de stabiliteit en structuur van het onderwater gelegen gedeelte van de dijk te evalueren.

#### 3.4.2. Sector scanner

##### i. Principe en uitvoering

De sector scanner wordt gebruikt om de geometrie van oevers en dijken nauwkeurig in kaart te brengen en om depressies, holtes of verzakkingen langs onderwatertaluds te detecteren.

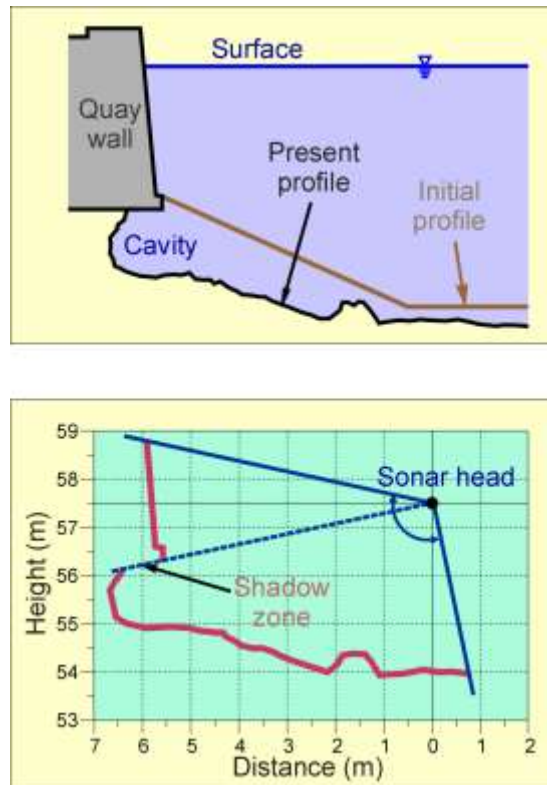
De sector scanner gebruikt een gefocuste akoestische puls om een punt op de bodem te belichten. Om meerdere punten naast elkaar te belichten, wordt de sonar gemonteerd op een roterende kop (Figuur 20). De range, scan snelheid en de sector die moet gescand worden, wordt ingesteld. Nadat een akoestische puls is uitgestuurd, registreert de sonar de tijd die het gereflecteerde signaal nodig heeft om terug de sonar te bereiken. Als men de voortplantingsnelheid door het water kent, kan men de afstand tussen de sonar en de bodem/object berekenen.



*Figuur 20: Principe van de sector scanner.*

De sector scanner wordt zo op het surveyschip geïnstalleerd dat profielen dwars op de oever kunnen opgenomen worden. Het surveyschip vaart dan langs de in te scannen oever en tijdens het varen meet de sector scanner punt voor punt een voorafbepaalde sector in. Op deze manier ontstaan verticale doorsneden van de oever (Figuur 21). Door dit te herhalen ontstaat een reeks van dwarsprofielen van de oever, waardoor deze nauwkeurig in beeld gebracht wordt.

De aanwezigheid van luchtbelletjes in het water zal de datakwaliteit sterk verminderen. Hoge turbiditeit zal de resolutie en dus de datakwaliteit verminderen. Sector scanner surveys geven geen informatie over de interne opbouw van dijken of over processen die zich afspelen aan de landzijde van dijken.



Figuur 21: Principe van een kaaimuurinspectie met een sector scanner.

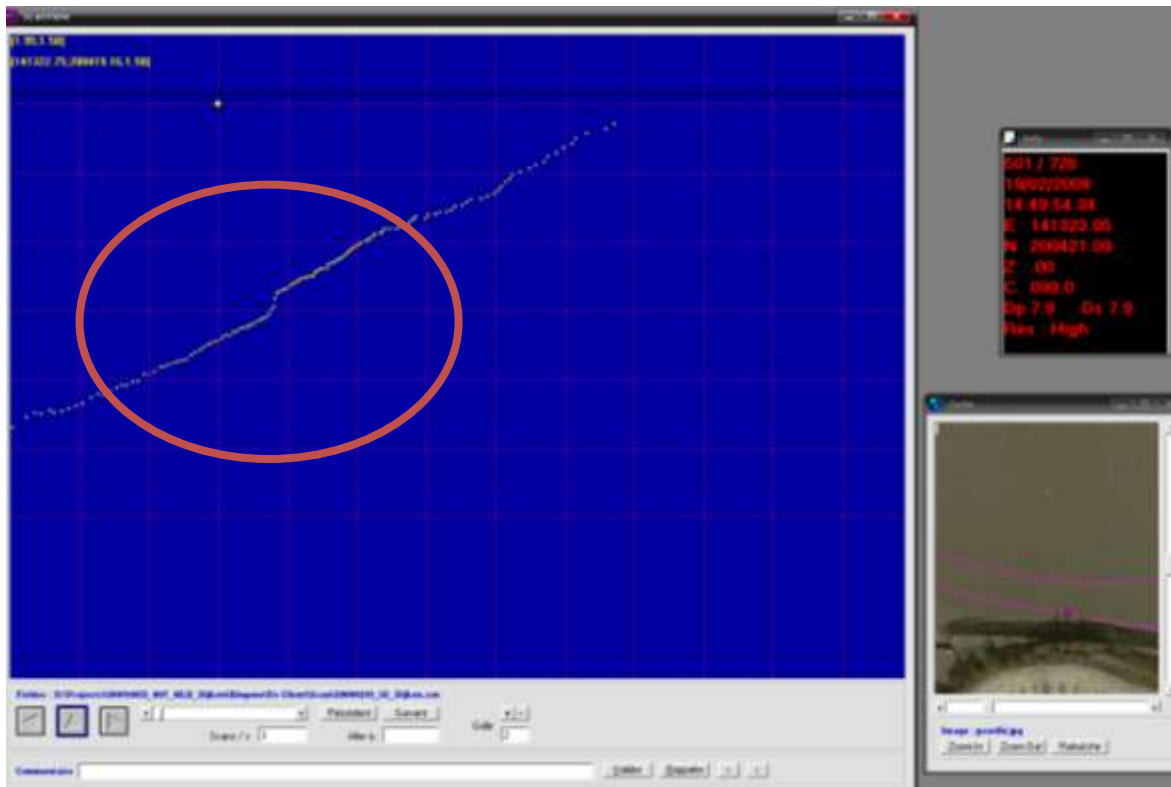
### ii. Meetresultaten

Te Hingene werden sector scanner metingen uitgevoerd en deze hebben verschillende onregelmatigheden aan de dijkflanken in kaart gebracht (zie voorbeelden hieronder).

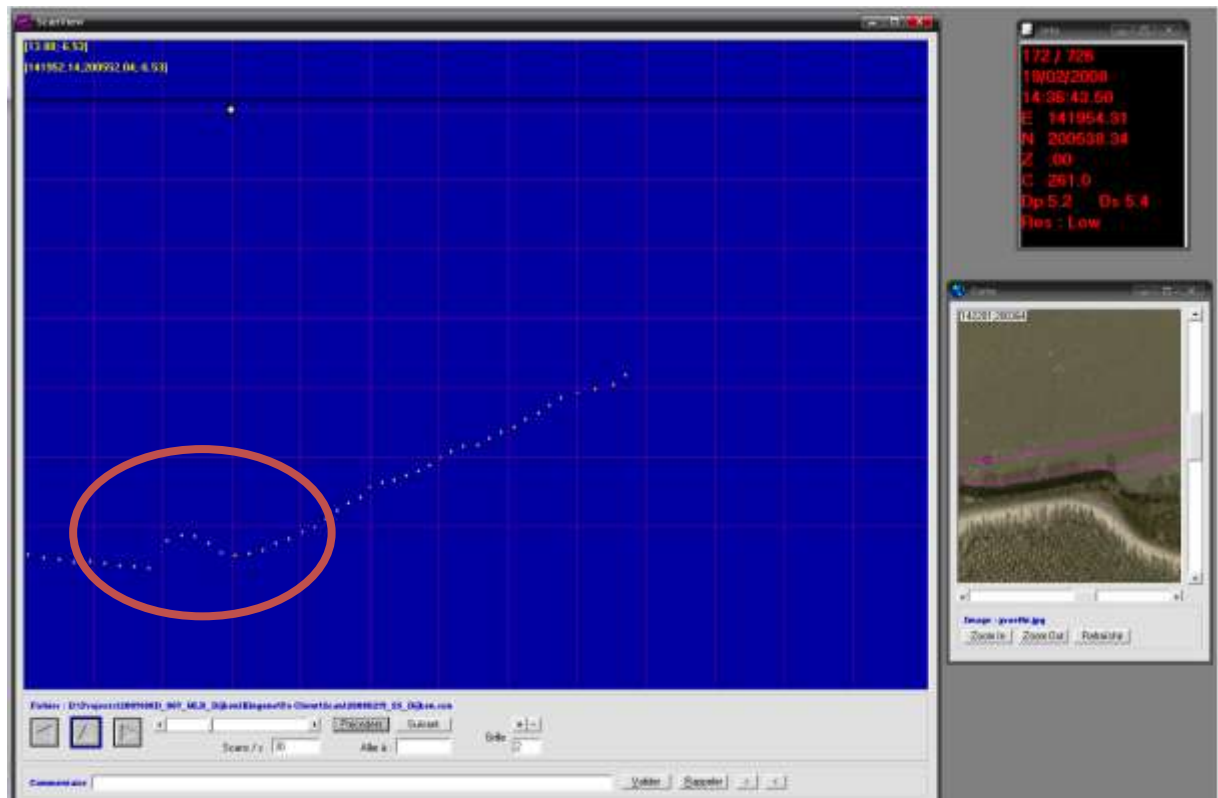
### iii. Bruikbaarheid

Sector scanner surveys hebben vooral nut waar het dijktafstand niet vrijkomt bij laag water, met andere woorden op kanalen en niet getij-gebonden rivieren. Daar laten ze toe op een snelle en efficiënte manier de onderwatertafstand in kaart te brengen en daarbij depressies, holtes of verzakkingen te detecteren. Deze fenomenen wijzen dikwijls op lokale instabiliteiten van de dijkwand.





Figuur 22: Mogelijk voorkomen van uitschuring ter hoogte van de onderkant tegen de dijktafsluiting.



Figuur 23: Voorkomen van afgegliden stortsteen aan de voet van de dijk.



### 3.5. Bewezen technologie of methoden

Binnen de studie zijn een aantal zeer courante methoden niet ingezet geworden omdat ze als bewezen technologie of methode worden beschouwd. Hieronder rekenen we als metingen op land de tijds-domein elektromagnetische metingen (het detecteren van metalen (in het algemeen)). Onder water is de multibeam bathymetrie inzetbaar. Onder water én op land is de magnetische gradiometrie (detecteren van ferromagnetische metalen (ijzer)) inzetbaar. De methoden zijn opgenomen in de overzichtstabel in Hoofdstuk 5 (Samenvatting).

#### 3.5.1. Magnetische gradiometrie

Magnetische gradiometrie is een meettechniek die zowel op land als op water kan worden toegepast. De meettechniek houdt in dat de sterkte van het aardmagnetisch veld met zeer nauwkeurige magnetometers (zgn. *cesium vapor magnetometers*) wordt opgemeten. Waar ferromagnetische objecten voorkomen, wordt het aardmagnetisch veld lokaal beïnvloed en resulteert in een magnetische anomalie die meetbaar is aan het oppervlak.

Magnetische gradiometrie betekent dat de gradiënt tussen twee afzonderlijke magnetometers berekend wordt. In de toepassing gericht op detectie van ondergrondse ferromagnetische materialen wordt de verticale gradient van het aardmagnetisch veld bepaald. Dit laat toe de magnetische anomalieën nauwkeuriger te bepalen omdat laterale (bv. verkeersborden, hekken, ...) of temporele (bv. magnetische stormen) invloeden weggefilterd worden. Dit laat toe de magnetische anomalie nauwkeuriger te bepalen. Voor singuliere objecten (bommen, metalen vaten, ...) en lijnobjecten (stalen kabel) kan de diepte en massa geschat worden op basis van de eigenschappen van anomalie (vorm, amplitude,...).

Deze techniek kan ingezet worden voor het nauwkeurig bepalen van het voorkomen van ijzeren objecten (kabels, leidingen, damplanken, ...).

#### 3.5.2. Tijdsdomein elektromagnetisme

Tijdsdomein elektromagnetisme (TDEM) is een inductieve meettechniek die qua principe enigszins te vergelijken is met frequentiedomein elektromagnetisme (FDEM, EM31). De uitvoering die we hier beschouwen is deze met de Geonics EM61.

De meettechniek houdt in dat er met een spoel heel kortstondig een elektromagnetisch veld wordt aangelegd en weer uitgeschakeld (bij FDEM is dit een continu veld). Hierdoor wordt de bodem 'opgeladen' maar door het wegvallen van het veld ontstaan een tijdsvariabel elektrisch veld in de bodem (afnemende Foucault-stromen) wat op zijn beurt een tijdsvariabel magnetisch veld opwekt. Dit tijdsvariabel magnetisch veld is meetbaar in dezelfde spoel: het vervallend magnetisch veld wordt op verschillende ogenblikken (in de orde van microseconden) gemeten. Het Foucault effect houdt langer aan in metalen objecten dan in de bodem die de objecten omringd. Op basis van het opgemeten verval van het veld kan dus bepaald worden of er al dan niet metaal in de bodem aanwezig is.

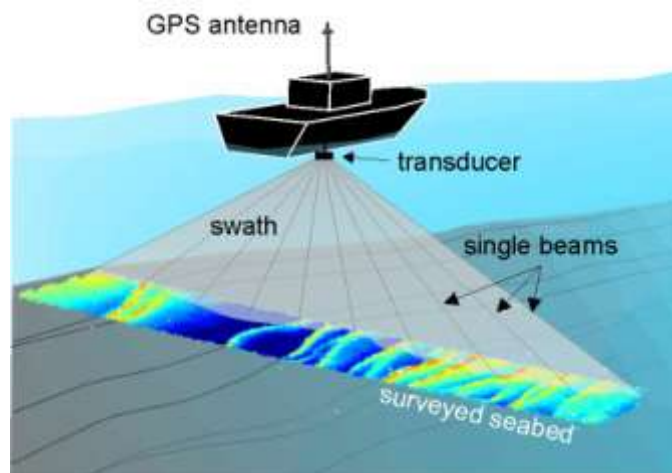
De meettechniek is in principe gelijkaardig aan de hand-metaaldetecters, echter de uitvoering van de EM61 laat een detectie tot maximum 3 meter toe, terwijl dit met hand-metaaldetecters hoogstens 30 cm is.

Deze techniek kan ingezet worden voor het nauwkeurig bepalen van het voorkomen van metalen objecten (kabels, leidingen, damplanken, ...) tot een diepte van maximum 3 meter.

### 3.5.3. Multibeam bathymetrie

Multibeam bathymetrie is een methode voor de nauwkeurige dieptebepaling van waterbodems die gebaseerd is op het uitzenden en ontvangen van een brede band van akoestische pulsen (in tegenstelling tot de sector scanner die met één gefocuste puls werkt). Het toestel, de multibeam echosounder, is in staat om een volledige scan van de bodem te maken in plaats van afzonderlijke meetpunten.

De techniek is complexer en duurder dan bv. sector scanner, maar er worden veel meer meetpunten op een veel kortere meettijd bekomen.



*Figuur 24: Principe van de multibeam echosounder.*

Het resultaat van de meting is een 3D digitaal hoogtemodel (of dieptemodel) van de waterbodem. Dit resultaat kan aangewend worden om op basis van de bodemmorfologie, structuurdefecten of erosieverschijnselen aan het onderwatergedeelte van de dijk te herkennen.

## 4. INZETBAARHEID VAN METHODES, PER FAALMECHANISME

### 4.1. Inleiding

In dit hoofdstuk worden een aantal berekeningen uitgevoerd die het mogelijk moeten maken de gevoeligheid in te schatten van de dijkopbouw op de dijkstabiliteit. Daaruit moet duidelijk worden welke gegevens over de opbouw minimaal gekend moeten zijn om een goede inschatting te kunnen maken van de dijkstabiliteit.

In onderstaande worden de verschillende faalmechanismen ten gevolge waarvan een dijk kan bezwijken overlopen en wordt aangegeven hoe niet-destructief onderzoek kan helpen om het betreffende faalmechanisme in te schatten. Deze faalmechanismen zijn:

- macrostabiliteit, langs riviortalud dan wel langs landtalud
- microstabiliteit, langs riviortalud dan wel langs landtalud
- erosie, van beide taluds
- piping

Daarnaast kan niet-destructief onderzoek helpen bij het inschatten van mogelijke zettingen.

Dijkstabiliteit wordt bepaald door de belasting op de dijk enerzijds en de weerstand van de dijk tegen deze belasting anderzijds. De dijk wordt instabiel als de belasting groter wordt dan de weerstand.

Welke belasting van belang is, hangt af van het beschouwde faalmechanisme. Voor erosie van het landtalud is dit bijvoorbeeld het overloop- of overslagdebiet. Voor het faalmechanisme macrostabiliteit is dit het verschil in waterstand aan rivierzijde en landzijde. Het niet-destructief onderzoek zal over het algemeen geen bijdrage leveren aan de inschatting van deze hydraulische belasting. De hydraulische belasting volgt uit metingen en/of uit modelresultaten.

Het niet-destructief onderzoek speelt dus vooral een rol bij de inschatting van de weerstand van de dijk tegen deze belasting. Deze weerstand wordt hoofdzakelijk bepaald door de aard en de afmetingen van de materialen waaruit de dijk is opgebouwd.

In de volgende paragrafen wordt voor elk faalmechanisme aangegeven of en hoe het niet-destructief onderzoek kan helpen bij het inschatten van deze weerstand. Uiteraard dient de weerstand van de dijk voor een bepaald faalmechanisme niet te worden onderzocht, als op basis van de hydraulische belasting kan worden afgeleid dat de kans op optreden van het betreffende faalmechanisme zeer klein is, wat ook de sterkte van de dijk zal zijn. Zo kan piping, zoals verder wordt besproken, zich pas voordoen als de verhouding tussen het waterpeilverschil tussen rivier- en landzijde enerzijds en de *footprint* van de dijk anderzijds (de breedte aan de teen) een bepaalde waarde overschrijdt. Als deze waarde duidelijk niet wordt overschreden, is het niet nodig op zoek te gaan naar de eventuele zandlaag onder de dijk. Een gelijkaardige redenering kan worden opgesteld voor andere faalmechanismen.

Het verder onderzoek naar bepaalde faalmechanismen kan op deze manier op voorhand worden uitgesloten. Het faalmechanisme macrostabiliteit zal in de praktijk vrijwel steeds verder moeten worden onderzocht. Een taludhelling moet reeds zeer flauw zijn en de dijk zeer laag, opdat zelfs met een slappe laag falings niet kan optreden.

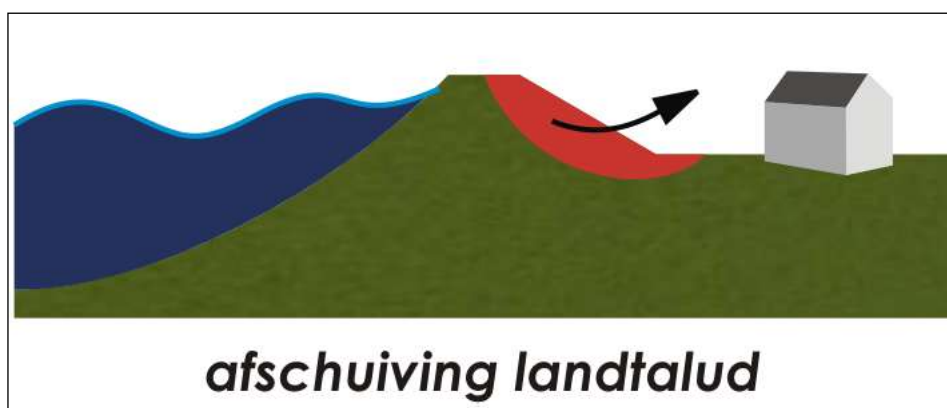
In sommige gevallen is het faalmechanisme reeds aan de gang, zonder dat de dijk reeds volledig is bezwaken. Ook dit begin van falen kan in bepaalde gevallen door niet-destructief onderzoek (of door waarnemingen in het algemeen) worden gedetecteerd. Het gaat daarbij dus niet over het inschatten van de weerstand (en bijgevolg van de dijkinstabiliteit) op zich, maar over het waarnemen van het begin van het faalmechanisme zelf. Waar van belang, zal dit ook in de volgende paragrafen worden behandeld.

## 4.2. Macrostabiliteit

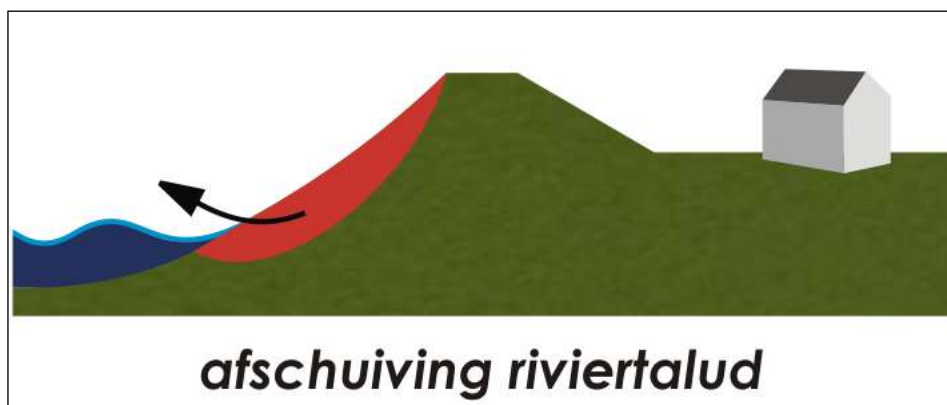
### 4.2.1. Beschrijving

Het faalmechanisme ‘macrostabiliteit’ behelst het afschuiven van grote delen van het grondlichaam langs een glijvlak door evenwichtsverlies. Het afschuiven kan plaatsvinden langsheen het riviertalud (na een plotse daling van het rivierpeil) of langsheen het landtalud (bij hoogwater). De ligging van de freatische lijn is daarbij een belangrijke aandrijvende kracht.

Het faalmechanisme wordt schematisch voorgesteld in Figuur 25 en Figuur 26.



Figuur 25: Schematische voorstelling van het faalmechanisme afschuiving landtalud.



Figuur 26: Schematische voorstelling afschuiving riviertalud.

De belangrijkste sterkteparameters voor het afschuiven zijn:

- het materiaal waaruit de dijk is opgebouwd (samenstelling van de verschillende lagen)
- de taludhelling en de dijkhoogte

Het niet-destructief onderzoek kan worden gebruikt bij het inschatten van het dijkmateriaal. Alvorens echter de toepassing van dit onderzoek te beschrijven, worden in volgende paragrafen een aantal berekeningsresultaten beschreven die moeten duidelijk maken welke parameters van de lagen een belangrijke invloed hebben op de dijkstabiliteit, zodat een idee wordt verkregen van welke gegevens minimaal nodig zijn.

### 4.2.2. Belasting

De verhanglijn doorheen de dijk vormt de belangrijkste belasting voor dit faalmechanisme. De ligging van de freatische lijn wordt meestal niet rechtstreeks gemeten maar kan worden uitgerekend door middel van grondwaterstromingsmodellen doorheen dijken (bijvoorbeeld de SEEP software van GeoStudio).

Randvoorwaarden voor de bepaling van de freatische lijn zijn het (ontwerp)rivierpeil en het grondwaterpeil aan landzijde.

Als de geometrie van dijk gekend is evenals de waterpeilen aan weerszijden van de dijk, kan men een stabiliteitsberekening uitvoeren in de veronderstelling dat de dijk opgebouwd is uit een zeer slappe kleilaag. Als de FOS-waarde zelfs bij deze conservatieve aanname groter is dan 1.3 is kennis van de dijkopbouw voor de beoordeling van de macrostabiliteit in principe niet nodig.

Voor het voorbeeld van de dijkgeometrie zoals verderop gegeven (zie 4.2.4) kan bijvoorbeeld worden berekend dat afschuiving van het landtalud zich niet zal voordoen (FOS groter dan 1.3) als het polderpeil 4.2 mTAW zou bedragen, ongeacht het materiaal waaruit de dijk is opgebouwd.

#### 4.2.3. Algemeen

Uit de analyse van de dijklichamen waarop in deelopdracht 1 onderzoek werd uitgevoerd samen met het onderzoek in opdracht van WenZ, afdeling Zeeschelde (gebieden cluster Kalkense Meersen, Vlassenbroek, Grote Wal, Kleine Wal Zwijn en Dijlemond) blijken vaak dezelfde lagen terug te keren in de opbouw van de dijk en de onmiddellijke ondergrond.

Ruw samengevat kunnen volgende lagen worden onderscheiden. Ze worden daarbij doorlopen van boven (net onder de kruin) naar beneden.

- Een toplaag van vette grond. Deze laag wordt meestal niet waargenomen in de resistiviteitstomogrammen. Deze laag is immers, als ze al aanwezig is, meestal slechts 0.5m dik. Wil men een dergelijke laag met behulp van resistiviteitstomografie kunnen waarnemen, is een zeer kleine elektrodenafstand vereist. Ook in de meetgegevens van de sonderingen is deze laag vaak niet waarneembaar.
- Een meer zandige laag. De dikte van deze laag varieert zeer sterk van locatie tot locatie. Vaak is deze laag ook afwezig. Ook de pakkingsdichtheid van deze laag varieert sterk (van losgepakt over matig gepakt tot sterk gepakt). Deze laag kan ook stenig materiaal bevatten.
- Een meer kleiige laag. Deze laag is overal aanwezig. Al naar gelang de aanwezigheid en de dikte van de zandige laag hierboven besproken, varieert de aanzet (de bovenkant) van deze kleiige laag. Ook de consistentie<sup>1</sup> van deze laag varieert van weinig vast (slappe klei) tot vast. Binnen deze laag komen in bepaalde gevallen ook veenlagen voor.
- Een dichtgepakte zandige laag, namelijk het Pleistoceen en/of zandig Tertiair
- Een consistente kleiige laag, de Tertiaire klei

In volgende paragrafen wordt aan de hand van SEEP en SLOPE berekeningen de invloed geanalyseerd van de dikte (en eventuele aanwezigheid) van de verschillende lagen en hun pakkingsdichtheid/consistentie op de macrostabiliteit van de dijken. Zowel de macrostabiliteit aan rivierzijde als aan landzijde worden daarbij onderzocht.

Om een vergelijking mogelijk te maken (overzichtelijkheid van de resultaten), werden al deze berekeningen uitgevoerd met dezelfde dijkgeometrie en hydraulische randvoorwaarden. De weerhouden dijkgeometrie en de randvoorwaarden zijn typische waarden voor een deel van het Zeescheldegebied. In het kader van andere studies (IMDC i.s.m. TTE & J. Maertens, 2009) werd reeds de impact nagegaan van de taludhelling en de dijkhoogte (die indirect bepaald wordt door de hydraulische randvoorwaarde) op de dijkstabiliteit. Er werd toen uitgegaan van een homogene dijkopbouw. Algemeen geldt dat de dijk instabieler wordt naarmate de

<sup>1</sup> De consistentie van cohesieve (kleiige) bodemmaterialen drukt uit in welke mate deze vast, plastisch of vloeibaar zijn en slaat dus op het watergehalte. De Atterberg limieten drukken de consistentiegrenzen tussen vast-plastisch (plastische limiet) en plastisch-vloeibaar (vloeibare limiet) uit.

taluds steiler en de dijken (en dus de hydraulische ontwerpbelasting) hoger worden. De conclusies uit onderstaande paragrafen worden uiteraard des te belangrijker naarmate deze gevallen zich voordoen.

#### 4.2.4. Beschrijving modelopbouw

Alle berekeningen werden uitgevoerd met SEEP en SLOPE. SLOPE/W is een softwarepakket van Geo-Slope international voor de berekening van de glijvlakken en hun overeenkomstige veiligheidsfactor (FOS of *factor of safety*). SEEP/W is een uitbreiding op dit pakket voor de dynamische berekening van de freatische lijn binnen het dijklichaam.

Om een vergelijking mogelijk te maken en omdat het niet-destructief onderzoek vooral zal worden ingeschakeld voor het bepalen van de aard en de dikte van het kernmateriaal, wordt voor alle berekeningen eenzelfde dijkgeometrie aangenomen. Deze is gebaseerd op de dijkgeometrie die in de huidige toestand vaak voorkomt langsheen de Zeeschelde:

- dijkkrui op 7.6 mTAW
- polderpeil op 2 mTAW
- kruinbreedte 5m
- taludhellingen aan weerszijden 12:4

Voor het bepalen van de beginvoorwaarden van de freatische lijn, werd een lange tijdreeks opgelegd, waarbij een gemiddeld getij (tussen 0 en 5 mTAW) steeds werd herhaald. Al naar gelang de ligging van de relatief ondoorlatende kleilaag waren langdurige berekeningen nodig alvorens tot een evenwichtssituatie werd gekomen.

Vertrekkende van deze beginvoorwaarden werd vervolgens een ontwerpgetij opgelegd met een maximaal waterpeil van 7.5 mTAW.

De SLOPE berekening werd telkens uitgevoerd voor de meest nadelige situatie binnen dit ontwerpgetij (die niet noodzakelijk samenvalt met het ogenblik van maximaal waterpeil).

Voor de situaties waar een dunne veenlaag aanwezig is, werden ook de glijvlakken die horizontaal in het veen gaan bekeken (via de optie 'geoptimaliseerde glijvlakken').

In onderstaande tabel worden de gebruikte waarden voor de geotechnische parameters samengevat:

Tabel 3: Materiaalkarakteristieken

<b>Laag</b>	<b>Beschrijving</b>	<b>c [kPa]</b>	<b><math>\varphi</math> [°]</b>	<b><math>\gamma_{unsat}</math> [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\gamma_{sat}</math> [kN/m<sup>3</sup>]</b>
1	matig gepakt zand	0	30	17	19
2	weinig tot matig vast (zandhoudend) klei	4	22	16	16
3	vast gepakt zand	0	35	18	20
4	vast gepakt klei	15	22	19	19
1b	los gepakt zand	0	27	16	18
5	veen	5	15	12	12
2b	Weinig vaste klei	2	20	16	16

#### 4.2.5. Scenario's

Het basisscenario is de referentiesituatie waarmee de andere berekeningen resultaten worden vergeleken.

In het basisscenario wordt uitgegaan van de volgende lagen en diktes:

Tabel 4: Laagdiktes basisscenario.

<b>Laag</b>	<b>Bovenkant laag [m TAW]</b>	<b>Dikte laag [m]</b>	<b>Pakkingsdichtheid/consistentie</b>
Zandige laag	7.6	2.6	Matig gepakt
Kleiige laag	5.0	6.5	Weinig à matig vaste (zandhoudende) klei
Vast gepakt zand	-1.5	6.5	Vast gepakt
Vaste klei	-8.0	-	vast

Er wordt daarbij in de berekeningen steeds verondersteld dat de bovenste zandige laag, indien aanwezig, zowel aan land- als aan rivierzijde wordt afgedekt met een waterondoorlatende laag van 0.5m dik.

Vertrekkende van dit basisscenario worden verschillende scenario's uitgerekend waarbij telkens een bepaalde karakteristiek wordt gewijzigd. De scenario's werden zo gekozen dat ze samen de volledige diversiteit dekken van dijsamenstellingen die in de verschillende dijksegmenten zoals hierboven beschreven werden tegengekomen.

In **scenario 1** wordt de **dikte van de bovenste zandige laag** gevarieerd, gaande van 1m dik (dus tot 6.6mTAW diep) tot 6.6m dik (dus tot 1mTAW). De dikte van de onderliggende kleiige laag varieert overeenkomstig. De overige parameters blijven constant.

In **scenario 2** wordt de **dikte van de tweede kleiige laag** gevarieerd, gaande van 4m dik (dus tot 1mTAW) tot 12m dik (dus tot -7 mTAW).

In **scenario 3** wordt de **pakkingsdichtheid van de bovenste zandige laag** gevarieerd.

In **scenario 4** wordt de **invloed van een veenlaag** onderzocht in de tweede meer kleiige laag. Deze veenlaag is steeds 1m dik en bevindt zich hetzij bovenaan in de kleiige laag, hetzij onderaan.

In **scenario 5** wordt de invloed van de **consistentie van de tweede kleiige laag** onderzocht.

In **scenario 6** wordt de invloed van de **dwarse variaties in de dijkopbouw** onderzocht.

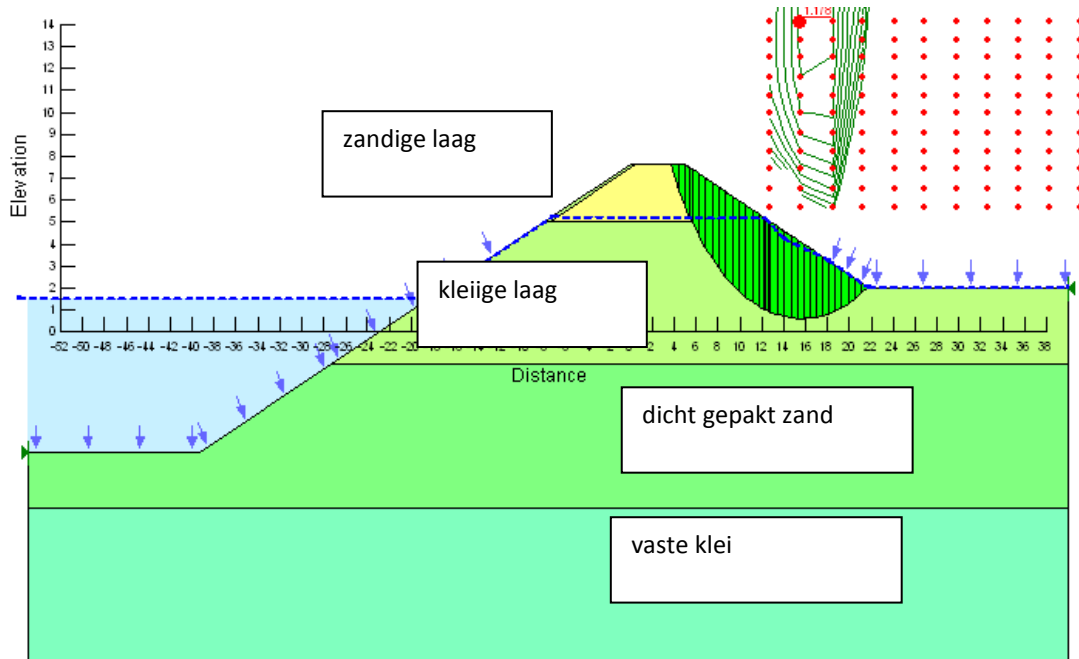
De parameters van de 3<sup>de</sup> en 4<sup>de</sup> laag werden niet gevarieerd, omdat uit eerste aftastende berekeningen werd vastgesteld dat ze geen invloed hebben op de macrostabiliteit.

In volgende paragrafen worden de resultaten van deze scenario's één voor één beschreven.

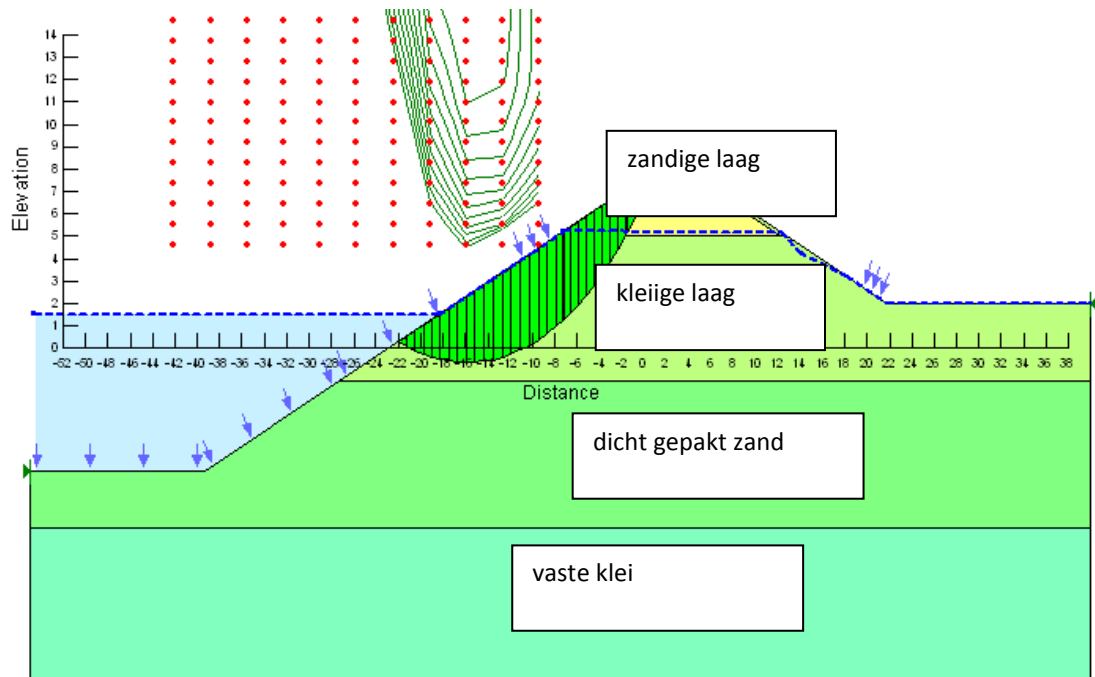
#### 4.2.6. Basisscenario

De freatische lijn zet zich in net op de scheiding tussen de zandige laag en de meer kleiige laag. Het glijvlak vindt grotendeels plaats doorheen de kleiige laag met een weinig vaste consistentie.

Onderstaande figuren tonen het glijvlak en de waarde voor de FOS.



Figuur 27: Basisscenario. Landzijde. FOS = 1.16.



Figuur 28: Basisscenario. Rivierzijde FOS = 1.02.

Het valt op te merken dat in het basisscenario reeds lage waarden worden bekomen voor de FOS, zeker aan rivierzijde. Een en ander heeft te maken met de aanwezigheid van de matig vaste kleilaag.

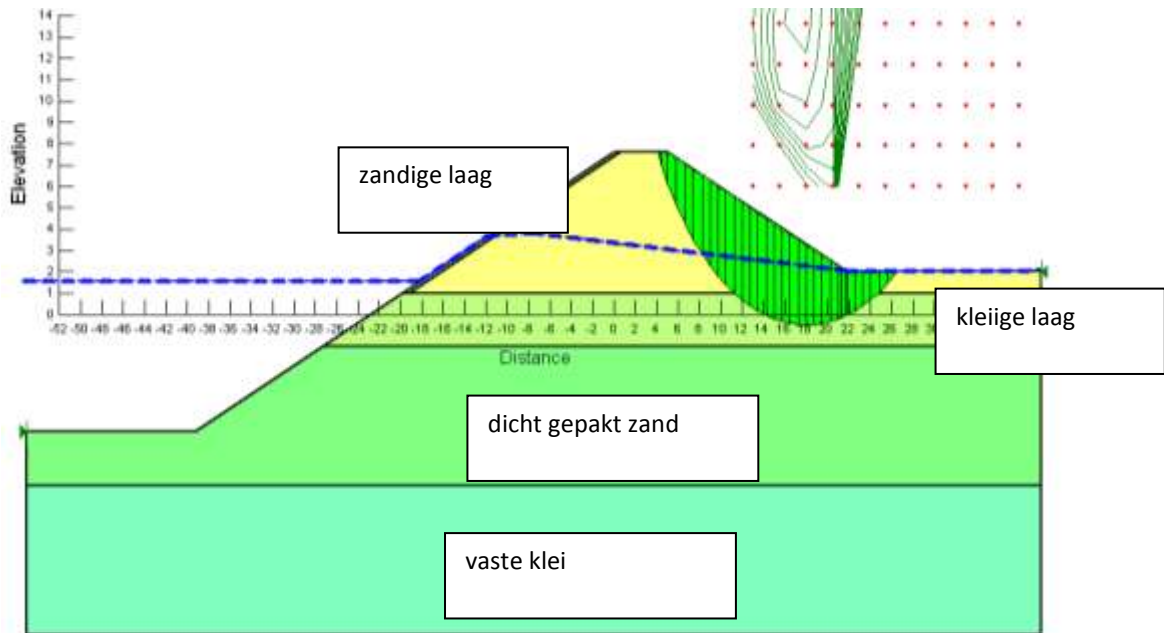


#### 4.2.7. Scenario 1: Invloed van de dikte van de bovenste zandige laag

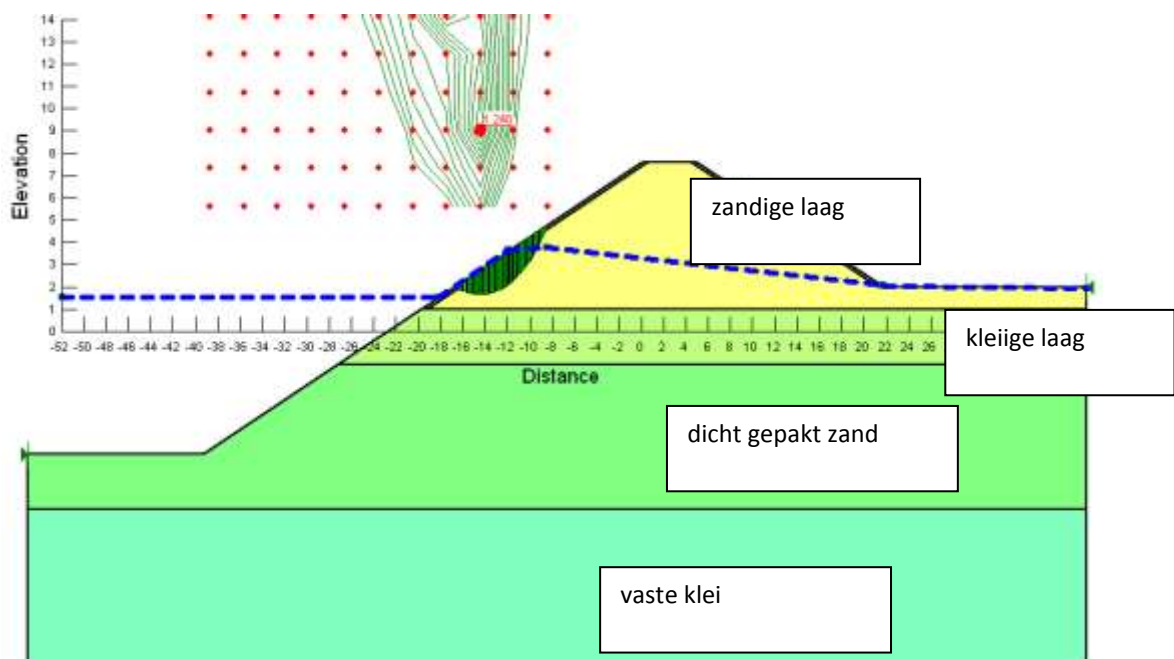
De freatische lijn loopt al naar gelang de dikte van het zandige pakket hetzij volledig door de zandige laag hetzij volledig door de kleiige laag. Doorheen de kleiige laag stelt de freatische lijn zich hoger in en treedt uit het landtalud. Onderstaande figuren tonen het glijvlak en de waarde voor de FOS.

Een dikker zandpakket heeft merkkelijk hogere FOS-waarden. Bovendien is het glijvlak aan rivierzijde ook kleiner.

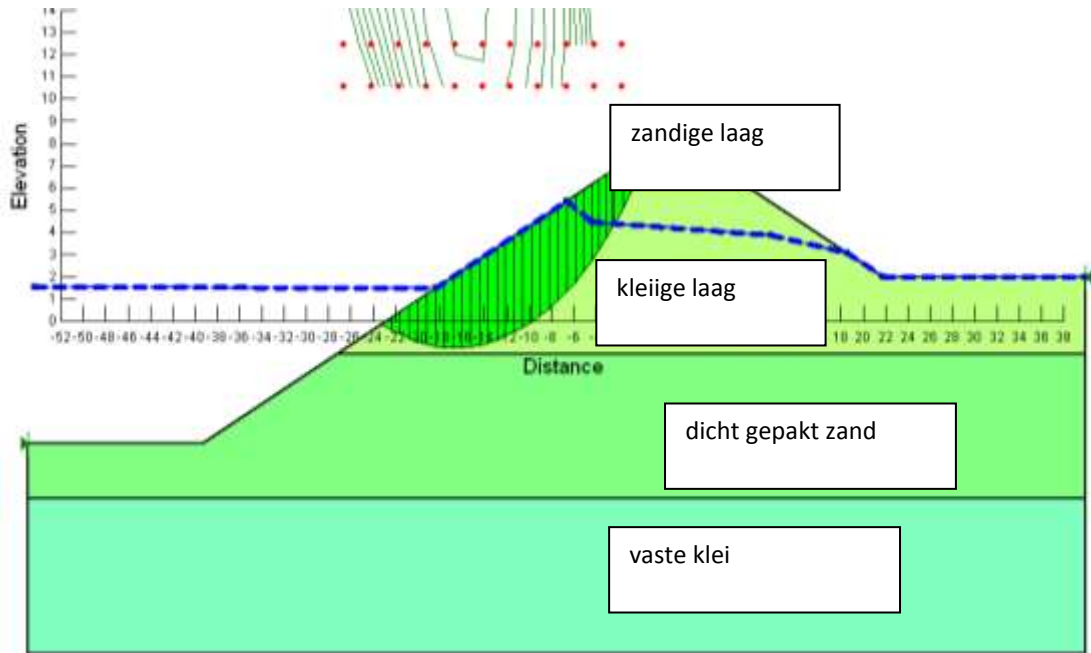
Het dunner zandpakket heeft hogere FOS waarden dan in het basisscenario. Blijkbaar is een scheiding tussen de doorlatende zandlaag en de minder doorlatende kleilaag net op hoogwaterniveau het meest nadelig.



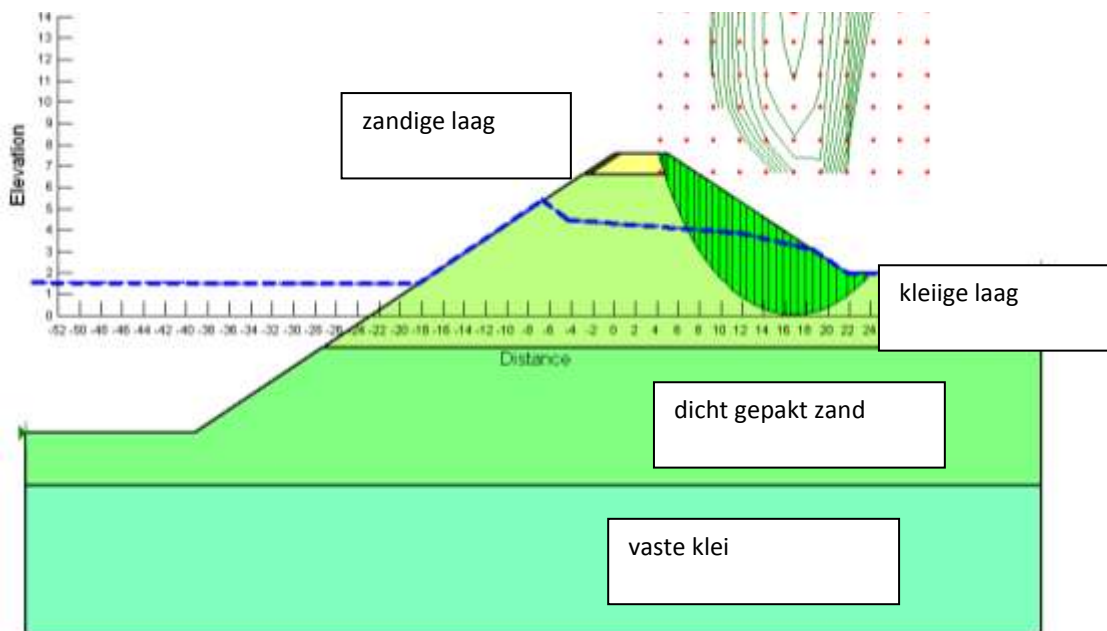
Figuur 29: Dikke zandige laag. Landzijde. FOS = 1.67



Figuur 30: Dikke zandige laag. Rivierzijde; FOS = 1.24.



Figuur 31: Dunne zandige laag. Rivierzijde. FOS = 1.06.

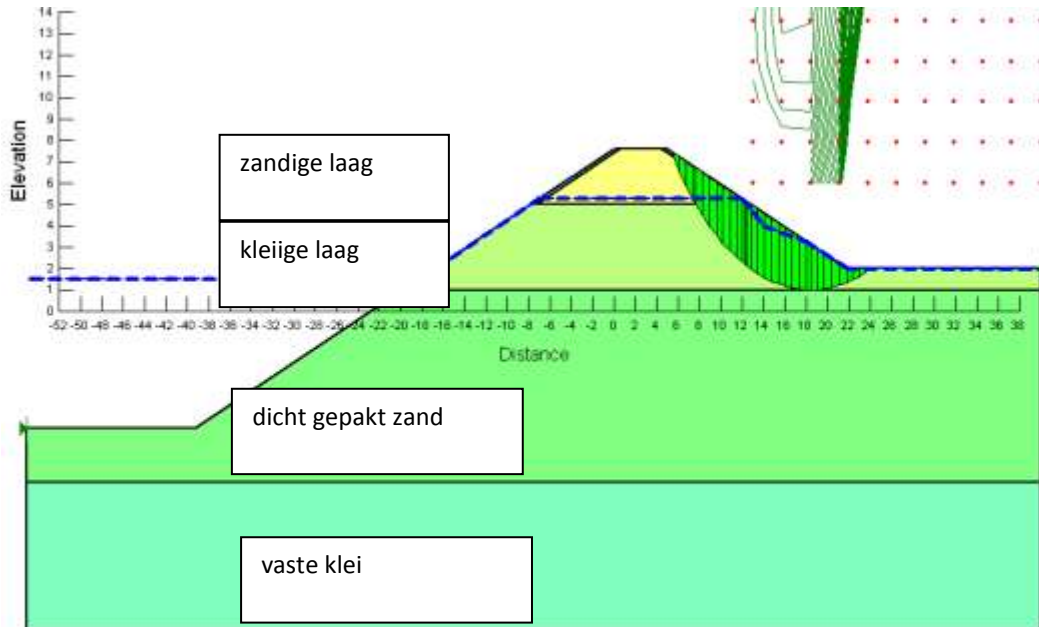


Figuur 32: Dunne zandige laag. Landzijde. FOS = 1.35.

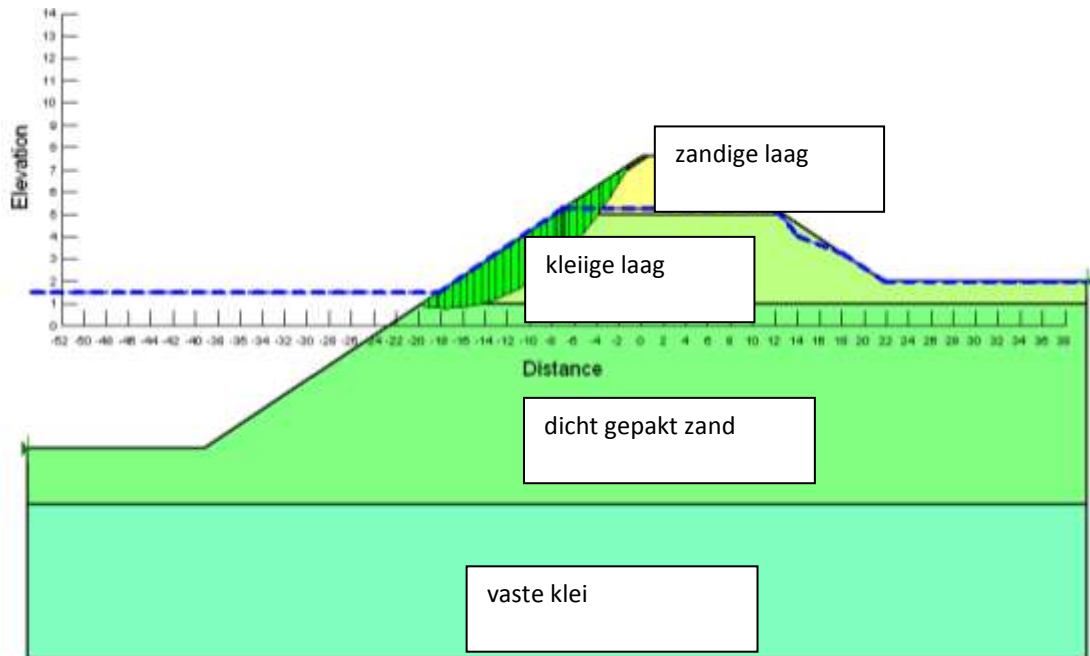
#### 4.2.8. Scenario 2: Invloed van de dikte van de tweede kleiige laag

Aangezien het glijvlak nog steeds grotendeels in de 2<sup>de</sup> kleiige laag plaatsgrijpt, is er weinig verschil met het basisscenario.

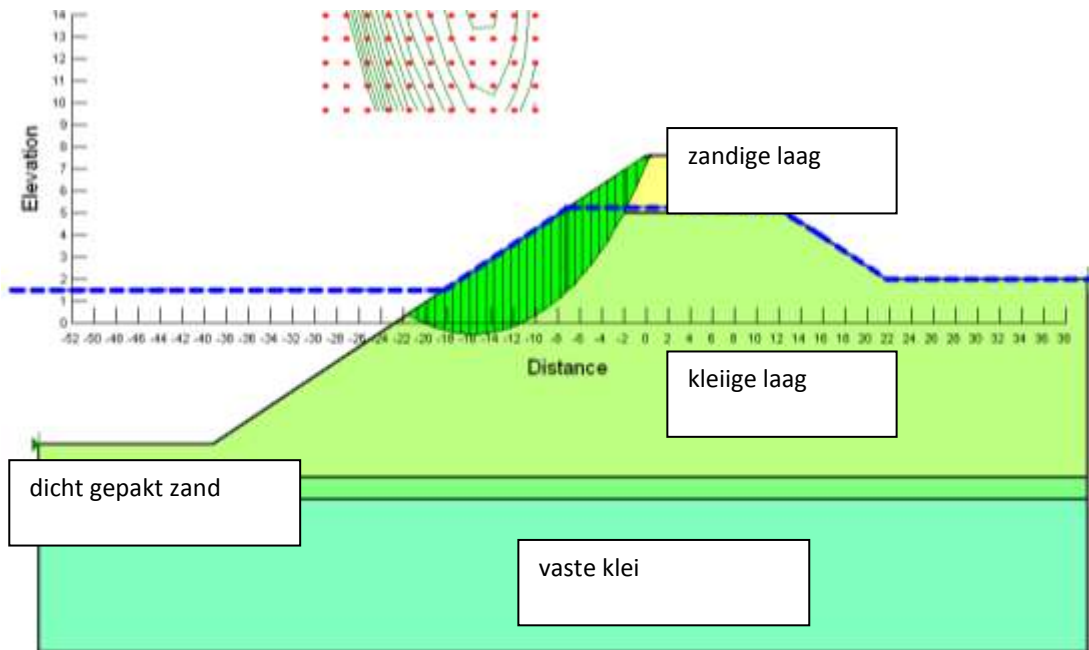
De onderstaande figuren tonen telkens het meest waarschijnlijke glijvlak en de bijhorende FOS.



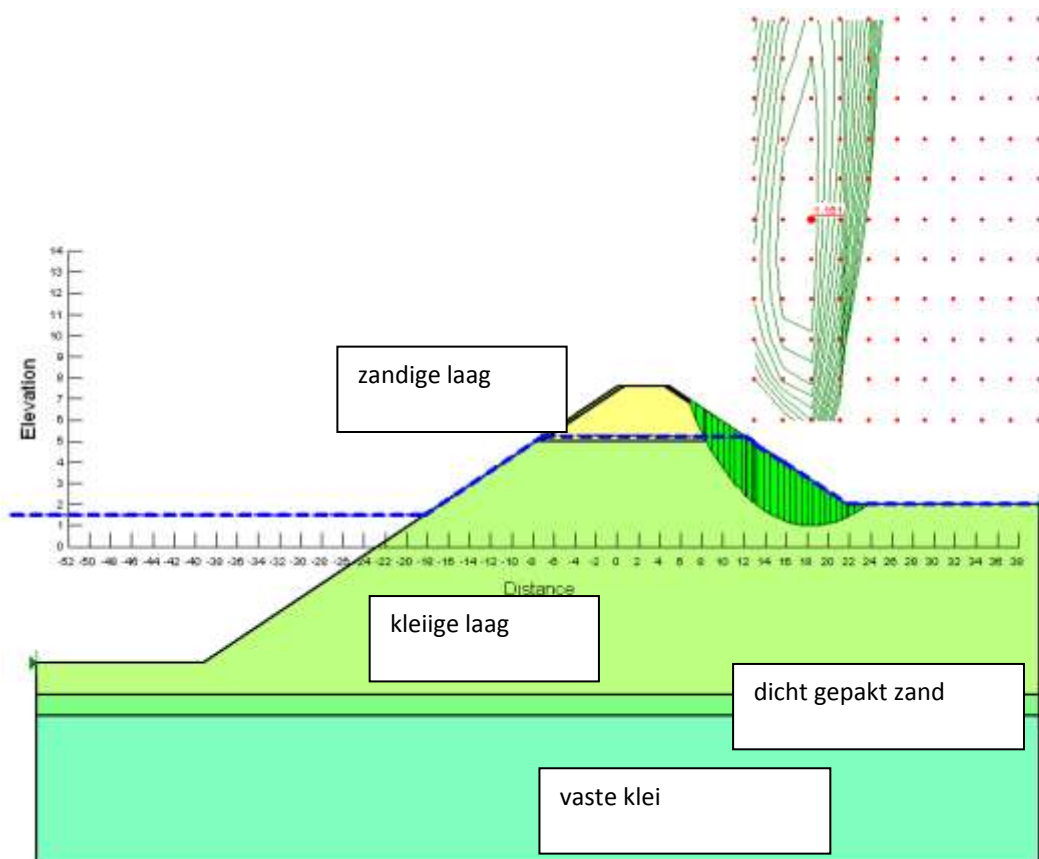
Figuur 33: Dunne kleiige laag. Landzijde. FOS = 1.19.



Figuur 34: Dunne kleiige laag. Rivierzijde. FOS = 1.06.



Figuur 35: Dikke kleiige laag. Rivierzijde. FOS = 1.02



Figuur 36: Dikke kleiige laag. Landzijde. FOS = 1.16.

#### 4.2.9. Scenario 3: Invloed van de pakkingsdichtheid van de zandige laag

In het basisscenario is het zandpakket matig gepakt. In dit scenario worden bijkomend berekeningen uitgevoerd voor een dicht gepakt zandpakket en een losgepakt zandpakket. Voor de grondkarakteristieken verbonden aan deze verschillende pakkingsdichtheden wordt verwezen naar Tabel 3.

De berekeningen werden uitgevoerd voor de verschillende diktes van het zandpakket, namelijk de dikte horende bij het basisscenario (2.6m) en een dik zandpakket van 6.6m (zie scenario 1). De resultaten zijn weergegeven in bijlage A. De FOS-waarden worden samengevat in onderstaande tabellen, respectievelijk voor het riviertalud en het landtalud.

Tabel 5: FOS-waarden riviertalud.

Dikte zandpakket	Los gepakt	Matig gepakt	Dicht gepakt
2.6m	1.02	1.02	1.01
6.6m	1.00	1.24	1.22

Tabel 6: FOS-waarden landtalud.

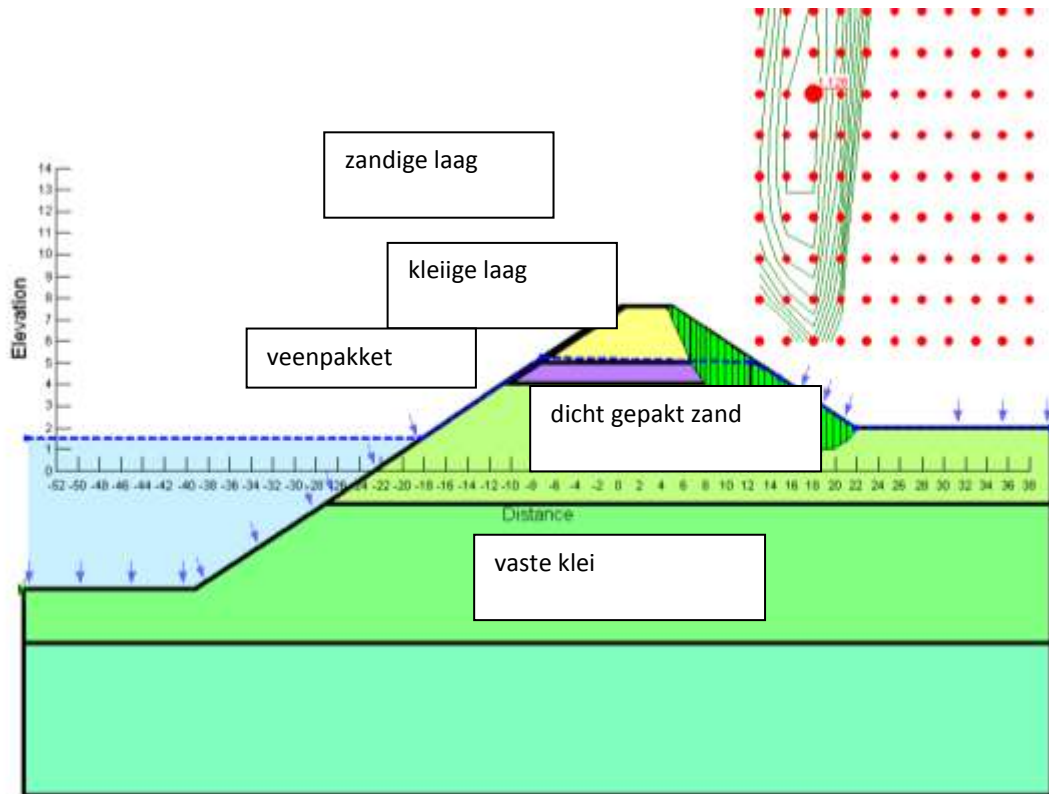
Dikte zandpakket	Los gepakt	Matig gepakt	Dicht gepakt
2.6m	1.16	1.16	1.16
6.6m	1.51	1.67	1.77

Aangezien het glijvlak bij het 'dunne' zandpakket nog steeds grotendeels in de 2<sup>de</sup> kleiige laag plaatsgrijpt, is er weinig verschil met het basisscenario. Voor een dikke zandlaag is de invloed van de pakkingsdichtheid wél van belang zijn. De FOS-waarde varieert al naar gelang de pakkingsdichtheid tussen 1.51 en 1.77 aan landzijde en tussen 1.00 en 1.24 aan rivierzijde.

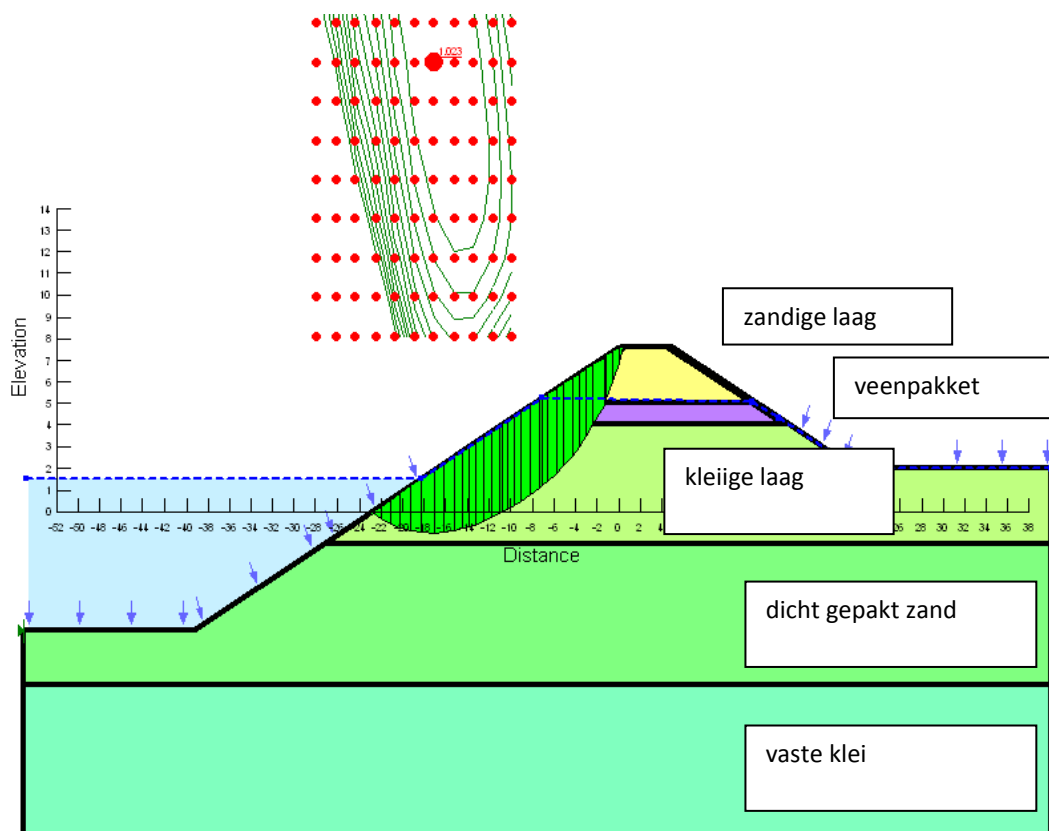
Opmerkelijk is dat bij een zandpakket met een dikte van 6.6m, het dicht gepakt zandpakket aan rivierzijde aanleiding geeft tot een lagere FOS-waarde dan het matig gepakt zandpakket. Vergelijking van Figuur 58 en Figuur 30 toont ook dat het glijvlak dieper ligt en doorheen de onderliggende kleilaag gaat.

#### 4.2.10. Scenario 4: Invloed van de aanwezigheid van veen

De veenlaag aan de bovenzijde heeft weinig effect op de macrostabiliteit. De invloed van een veenlaag aan de onderzijde is wel van belang. In dit laatste geval grijpt immers een groter deel van de glijcirkel plaats doorheen de veenlaag.

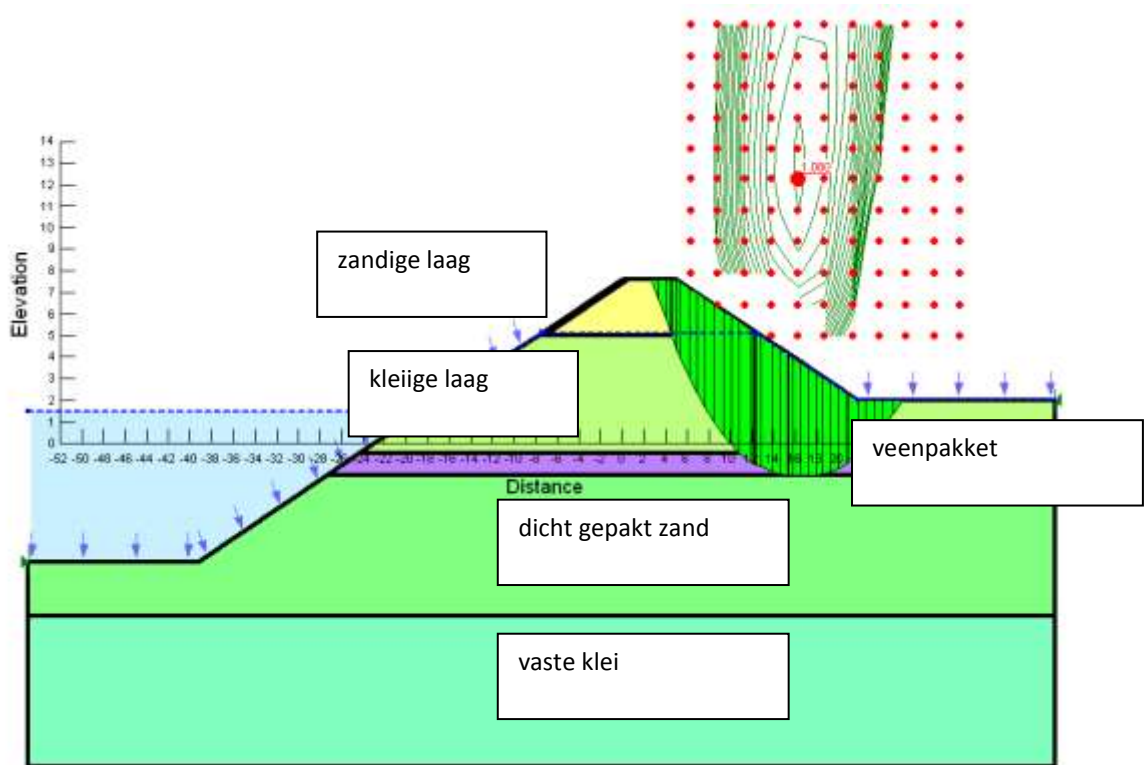


Figuur 37: Veenlaag bovenaan. Landzijde. FOS = 1.13.

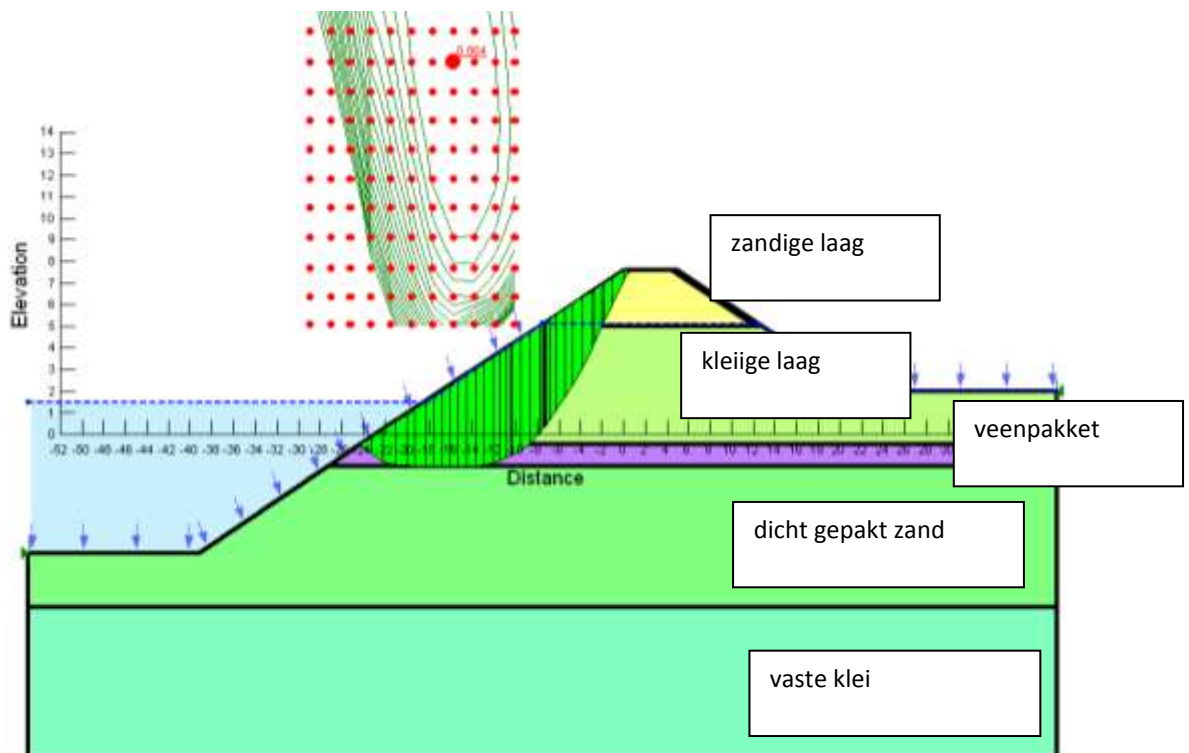


Figuur 38: Veenlaag bovenzijde. Rivierzijde. FOS = 1.02.





Figuur 39: Veenlaag onderzijde. Landzijde. FOS = 1.08.

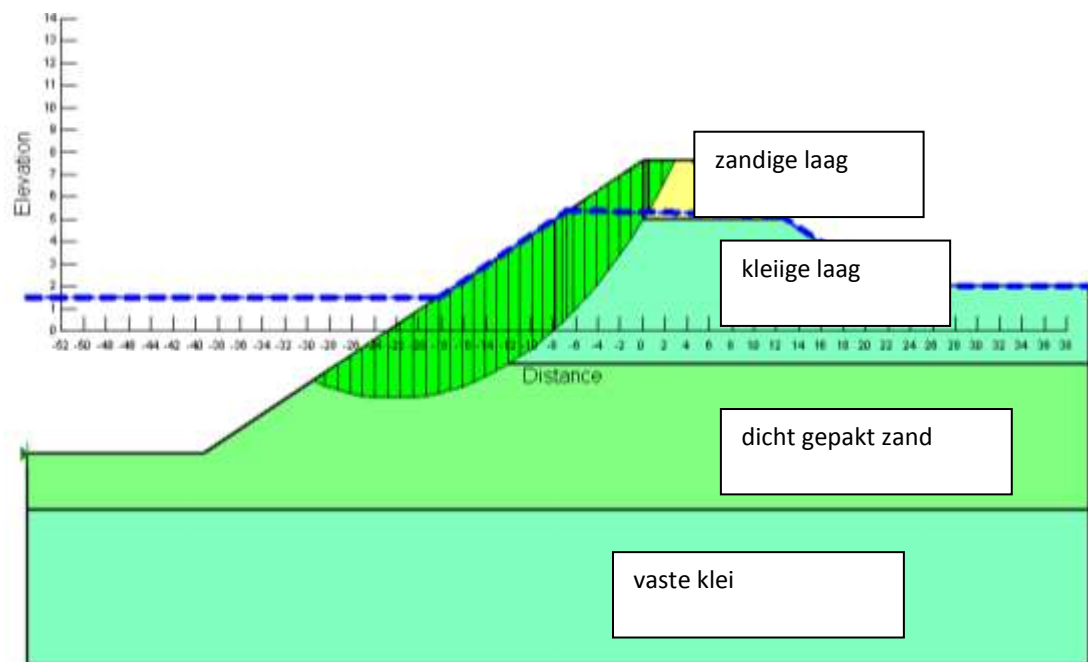


Figuur 40: Veenlaag onderzijde. Rivierzijde. FOS = 0.86.

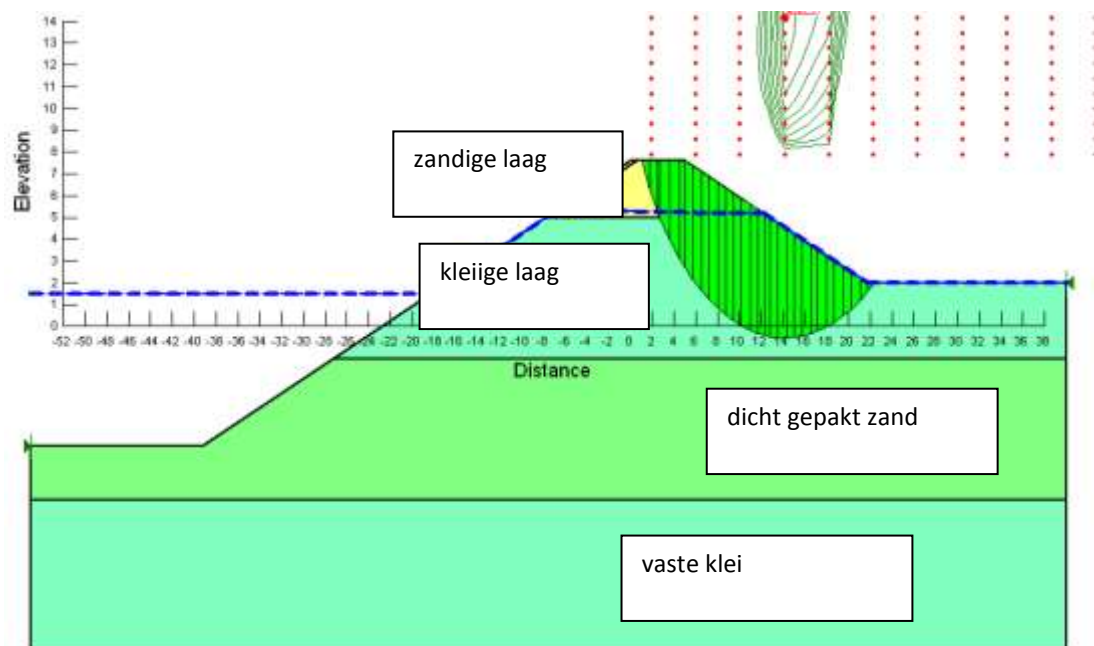


#### 4.2.11. Scenario 5: Invloed van de consistentie van de kleilaag

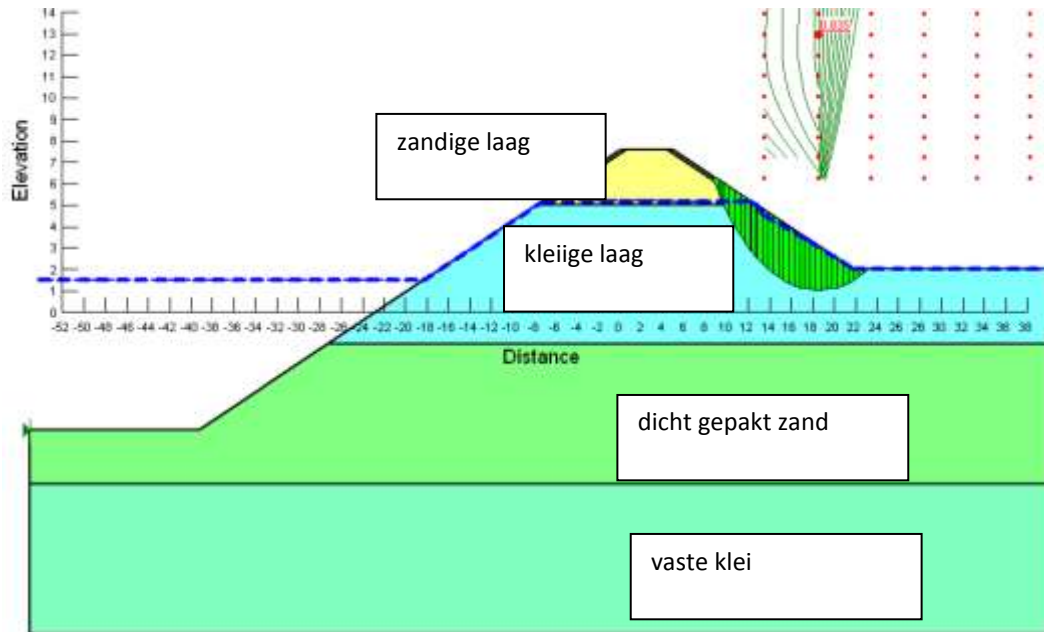
De impact van de consistentie van de 2<sup>de</sup> kleiige laag is van zeer groot belang voor de inschatting van de macrostabiliteit, zoals blijkt uit onderstaande figuren.



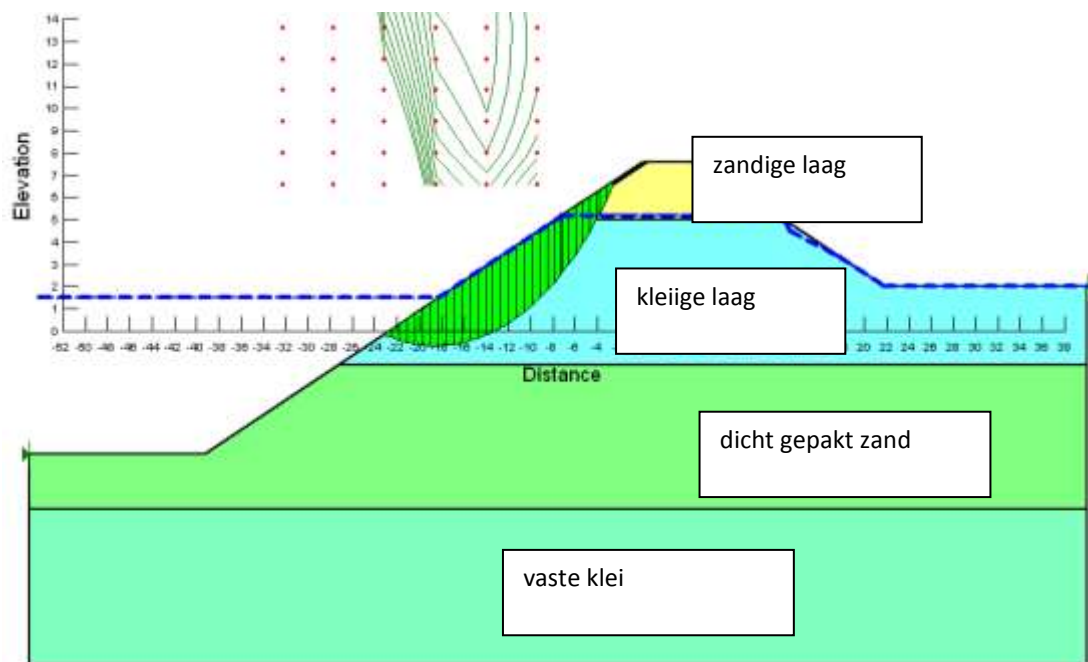
Figuur 41: Vaste klei. Rivierzijde. FOS = 1.62.



Figuur 42: Vaste klei. Landzijde. FOS = 2.07.



Figuur 43: Weinig vaste klei. Landzijde. FOS = 0.84.



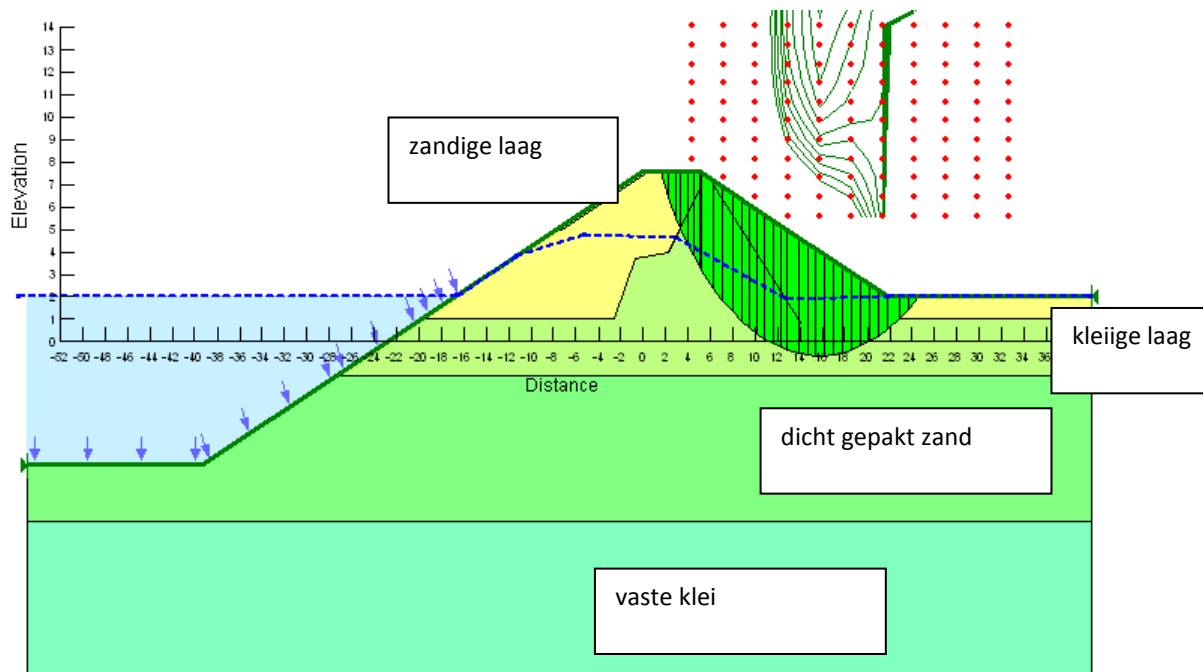
Figuur 44: Weinig vaste klei. Rivierzijde. FOS = 0.76.

#### 4.2.12. Scenario 6: Invloed van dwarse heterogeniteiten

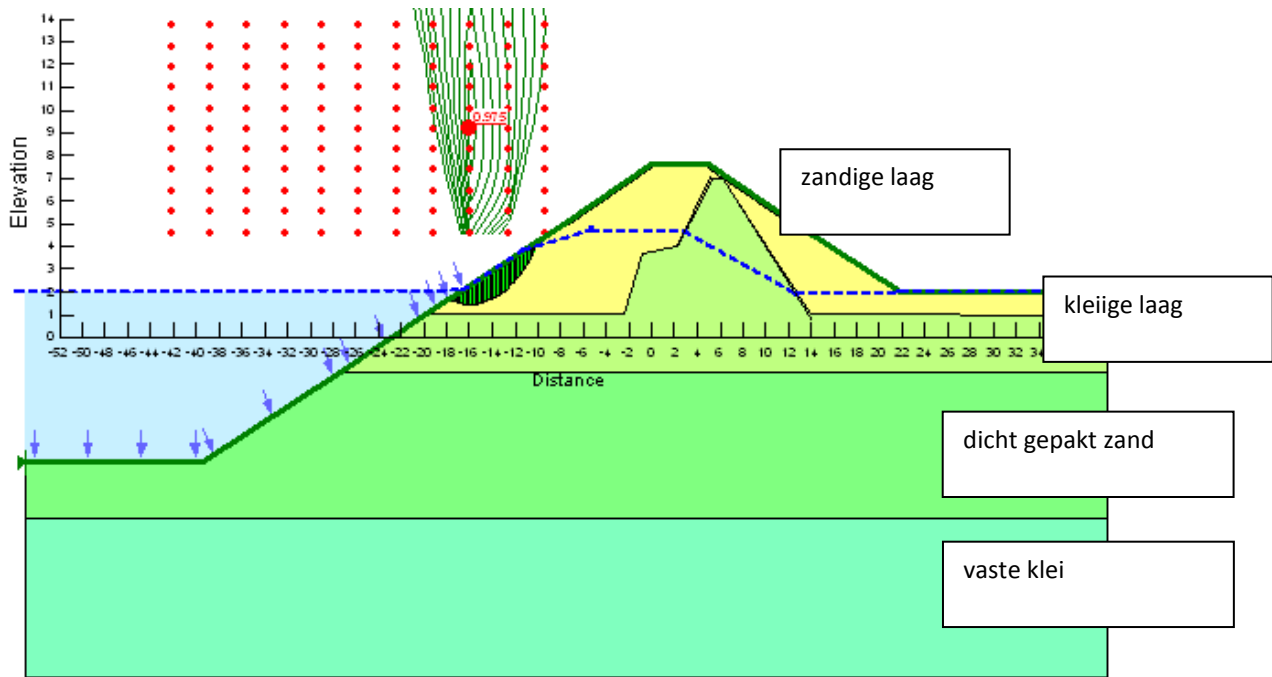
In bovenstaande berekeningen werd er steeds vanuit gegaan dat de dijk is opgebouwd uit een aantal horizontaal gelegen lagen en dat er geen variatie is in de dwarsrichting. Dit is in de praktijk niet steeds het geval. Een typisch voorbeeld van een dwarse variatie is de aanwezigheid van een zogenaamde ‘paterkesdijk’ in het dijklichaam. Deze oude dijk, meestal volledig opgebouwd uit vette grond, wordt gekenmerkt door steilere hellingen en een gevoelig kleinere breedte aan de teen dan de ‘moderne’ dijken. Deze oude dijken werden in de loop der jaren opgehoogd en verbreed vaak met zandig materiaal. De verbreding gebeurde over het algemeen aan landzijde (de paterkesdijk bevindt zich in dat geval dus aan rivierzijde), maar in bepaalde gevallen kan de paterkesdijk ook gesitueerd zijn aan landzijde.

Vertrekkende van de dijk met een dik zandpakket (zie scenario 3) werd een paterkesdijk in het model ingebracht met volgende afmetingen: kruinhoogte tot 7.0mTAW, kruinbreedte = 3m en taludhellingen van 9:4. De paterkesdijk heeft dezelfde geotechnische kenmerken als die van de weinig à matig vaste klei waarop ze rust (zie Tabel 3).

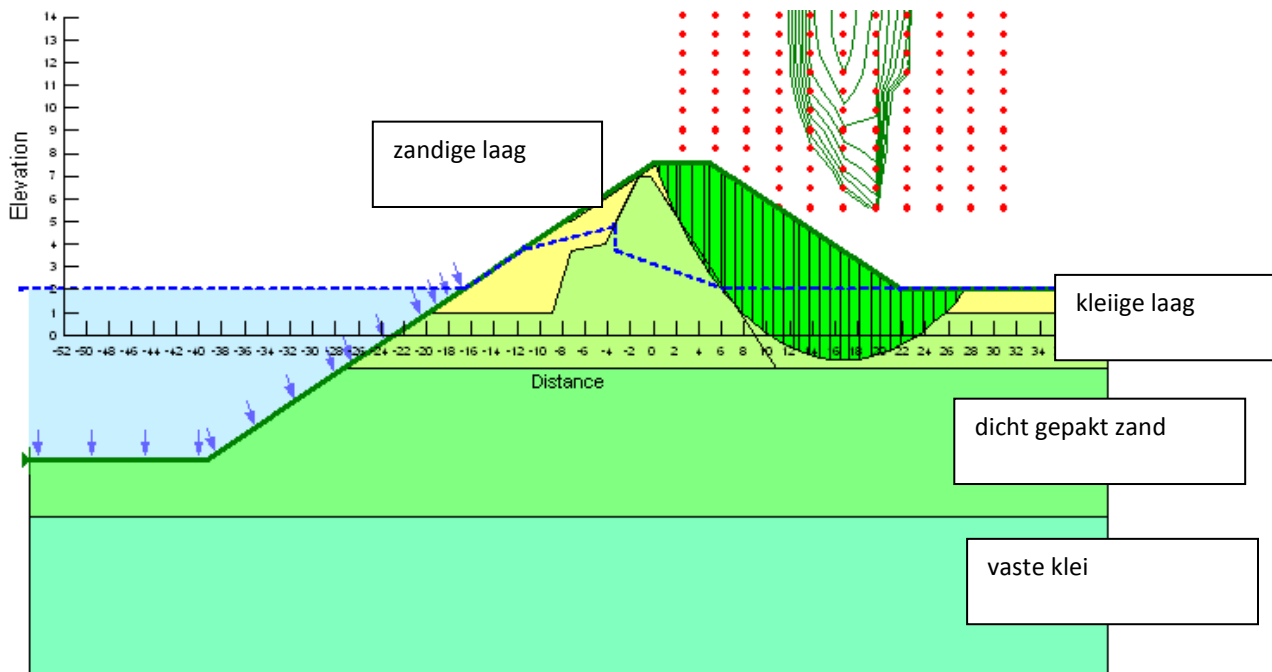
De resultaten worden grafisch weergegeven in de vier onderstaande figuren en samengevat in Tabel 7.



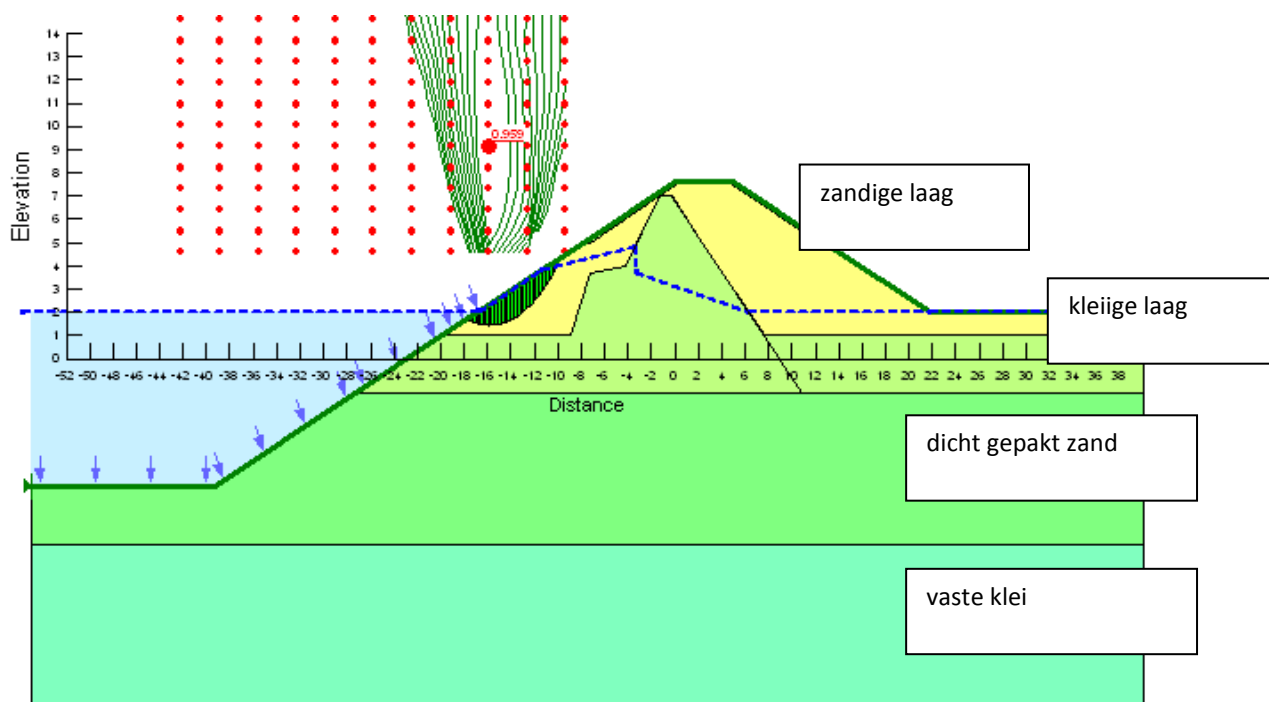
Figuur 45: Paterkesdijk aan landzijde, landtalud; FOS = 1.65



Figuur 46: Paterkesdijk aan landzijde, riviertalud; FOS = 0.98



Figuur 47: Paterkesdijk aan rivierzijde, landtalud; FOS = 1.76



Figuur 48: Paterkesdijk aan rivierzijde, riviertalud; FOS = 0.96

Eerst en vooral kan worden vastgesteld dat de paterkesdijk een belangrijke invloed heeft op de ligging van de freatische lijn. Het grootste peilverschil vindt plaats over de paterkesdijk. Aan landzijde wordt hierdoor een nagenoeg horizontale lijn bekomen, aan rivierzijde komt de freatische lijn hoger te liggen met als gevolg een groter verhang over het riviertalud.

Tabel 7: FOS-waarden met invloed van paterkesdijk.

Scenario	FOS landtalud	FOS riviertalud
homogene kleidijk	1.15	1.02
homogene zanddijk	1.67	1.24
Paterkesdijk aan landzijde in zanddijk	1.65	0.98
Paterkesdijk aan rivierzijde in zanddijk	1.76	0.96

Hoewel het glijvlak aan rivierzijde volledig plaatsgrijpt binnen de zandige laag, zijn de FOS-waarden gevoelig lager dan bij een homogene zanddijk (0.96 à 0.98 tegenover 1.24). De FOS-waarden zijn ook iets lager t.o.v. de situatie waarbij de volledige dijk uit klei zou zijn opgebouwd.

In vergelijking tot een homogene zanddijk zorgt de aanwezigheid van een paterkesdijk rivierzijde voor een grotere FOS-waarde aan landzijde. Het glijvlak vindt nog steeds volledig plaats in de zandlaag, maar het verhang van de freatische lijn is veel kleiner. Bij de aanwezigheid van een paterkesdijk aan landzijde wordt de FOS-waarde aan landzijde iets kleiner. De afschuiving vindt nu gedeeltelijk plaats doorheen de paterkesdijk zelf. De FOS-waarden zijn in ieder geval groter dan bij een homogene kleidijk (1.65 à 1.76 tegenover 1.15).

Op basis van sonderingen alleen kan de aanwezigheid van een paterkesdijk niet (steeds) worden onderkend. Toch heeft de aanwezigheid een belangrijke invloed op de macrostabiliteit. Stel dat men bijvoorbeeld bij de opbouw van de dijk zoals in Figuur 45 een sondering zou uitvoeren van op de kruin aan landzijde, dan zou men daaruit verkeerdelijk kunnen concluderen dat men met een homogene kleidijk te maken heeft, (bovenaan afgedekt door een dunne zandlaag). Hierdoor zou de macrostabiliteit aan landzijde sterk worden onderschat

(FOS waarde van 1.15 tegenover 1.65). Of stel dat men op basis van een sondering van op de kruin aan landzijde in een dijk met opbouw zoals in Figuur 48 zou concluderen dat de volledige dijk uit zand is opgebouwd, dan zou de macrostabiliteit aan rivierzijde sterk worden overschat (FOS-waarde van 1.24 tegenover 0.96).

Het is daarom belangrijk inzicht te verkrijgen in de dwarse variaties in de dijk. Deze kunnen worden verkregen door resistiviteitsstomografieën dwars op de dijk. Belangrijk knelpunt daarbij is de aanwezigheid van breuksteen aan rivierzijde, die de opname van een voldoende diepe dwarstomografie belemmert.

Een ander aspect is het voorkomen van damplanken. De detectie ervan is mogelijk met magnetische of elektromagnetische methoden. De invloed ervan op de dijk is echter per geval te evalueren. Zie ook §4.7.

#### 4.2.13. Toepassing van het niet-destructief onderzoek

In Tabel 8 worden de resultaten van de vorige paragrafen samengevat.

Tabel 8: Samenvatting van de berekeningsresultaten voor de verschillende scenario's.

Scenario	betroffen laag	onderdeel	wijziging	#	FOS landtalud	FOS riviertalud
0			Basisscenario	1	1.16	1.02
1	1 (zand boven)	A	7.6 mTAW tot 1 mTAW	2	1.67	1.24
		B	7.6 mTAW tot 6.6 mTAW	3	1.35	1.06
2	2 (weinig à matig vaste klei)	A	5.0 mTAW tot 1 mTAW	4	1.19	1.06
		B	5.0 mTAW tot -7 mTAW	5	1.15	1.02
3	1 zand boven	A	dicht gepakt (ipv matig)	6	1.16	1.01
		B	los gepakt (ipv matig)	7	1.16	1.02
4		A	veen tussen 5 en 4 mTAW	8	1.13	1.02
		B	veen tussen -1.5 en 0.5 mTAW	9	1.08	0.86
5	2 (klei)	A	vaste klei (ipv weinig à matig vast)	10	2.07	1.62
		B	weinig vaste klei (ipv weinig à matig vast)	11	0.84	0.76
6	1 (zand boven) Dwarse heterogeniteit	A	Paterkesdijk aan landzijde	14	1.65	0.98
		B	Paterkesdijk aan rivierzijde	15	1.76	0.96

Uit een globale analyse van de resultaten blijken volgende parameters van groot belang voor de macrostabiliteit, zowel aan landzijde als aan rivierzijde:

- de dikte en consistentie van het bovenste zandige pakket: een dik (matig gepakt) zandig pakket zorgt over het algemeen voor een grotere dijkestabiliteit dan wanneer het dijklichaam grotendeels uit de veelal weinig tot matig vaste klei bestaat. De stabiliteit neemt nog sterk toe naarmate de consistentie van het zandpakket toeneemt.
- als het dijklichaam dan toch grotendeels uit klei bestaat, speelt de consistentie ervan een zeer belangrijke rol. Daar waar zeer slappe klei aanleiding geeft tot FOS-waarden kleiner dan 1, zal zeer consistente klei tot waarden leiden van meer dan 1.5 tot 2.
- een veenlaag aan de onderzijde van het kleipakket heeft een negatieve invloed op de macrostabiliteit
- de dwarse variaties in de dijkopbouw

Samengevat moet men, om de dijkstabiliteit te kunnen inschatten, niet alleen kennis hebben van de aanwezigheid en de dikte van de bovenste zand- en kleilagen, maar moet men ook kennis hebben van de consistentie van deze lagen, vooral dan als het een kleilaag betreft.

Op basis van de resistiviteitstomografieën, eventueel voorafgegaan door EM31-metingen kan men meestal zeer goed de aanwezigheid en de dikte van de bovenste zandige laag en van de daaronder gelegen kleilaag waarnemen. Ook de consistentie van de bovenste zandige laag volgt meestal goed uit de meetgegevens. Dicht gepakte zandlagen geven aanleiding tot hogere resistiviteiten dan de minder gepakte zandlagen. De consistentie van de kleilaag en de eventuele aanwezigheid van een veenlaag aan de onderzijde volgen meestal niet uit deze methodes.

Om een inschatting maken van deze consistentie lijken een aantal seismische methodes veelbelovend, maar werden tot nog toe onvoldoende getest op dijken. Het gaat om de methodes 'refractie met P-golven' en de MASW-methode (meerkanaals analyse van oppervlaktegolven). Op basis van literatuur kan worden gesteld dat de MASW veelbelovend is. De methode is zeer gevoelig voor 2D/3D effecten. De dwarsstructuur in dijken zou eventueel de goede ontwikkeling van de golven kunnen verstoren. Verder onderzoek is hier dus aangewezen. Daarom wordt aangeraden om bij de aanwezigheid van kleilagen voldoende sonderingen (en eventueel boringen) te voorzien om de consistentie van de laag in te schatten.



### 4.3. Erosie riviertalud en landtalud

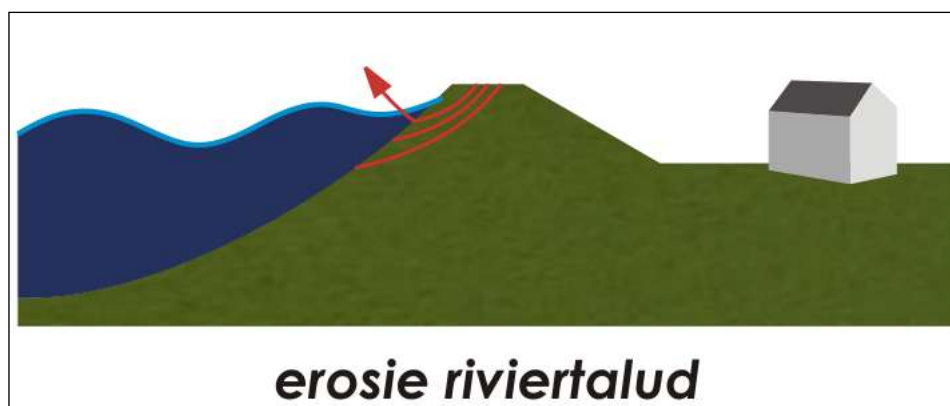
#### 4.3.1. Beschrijving

Wat betreft de erosie dient er een onderscheid te worden gemaakt tussen erosie van het riviertalud en erosie van het landtalud.

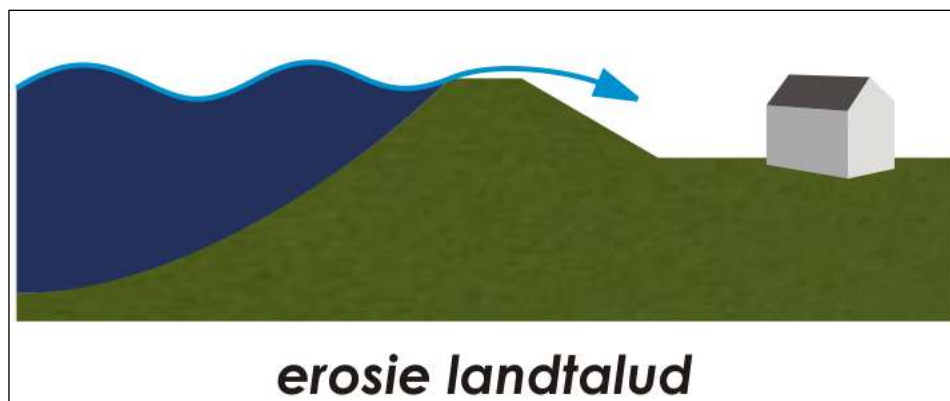
Erosie van het riviertalud betreft het eroderen of instabiel worden van de bekleding van het riviertalud onder invloed van golfwerking (veroorzaakt door wind en/of scheepvaart), getijdewerking en/of hoge stroomsnelheden.

Erosie van het landtalud betreft het eroderen of instabiel worden van de bekleding van het landtalud onder invloed van overloop (als het waterpeil op de waterloop hoger komt dan het kruinpeil) en/of golfoverslag (door een combinatie van hoge waterpeilen en een hoge golfbelasting).

Beide faalmechanismen worden schematisch voorgesteld respectievelijk in Figuur 49 en Figuur 50.



Figuur 49: Schematische voorstelling van het faalmechanisme erosie riviertalud.



Figuur 50: Schematische voorstelling van het faalmechanisme erosie landtalud.

De weerstand tegen erosie wordt voor beide taluds gevormd door:

- het type van de bekleding: vegetatie, betonplaat, open steenasfalt, steenbestorting, ...
- de dimensies van de bekleding
- de algemene toestand waarin de bekleding zich bevindt

- de aanwezigheid en de dikte van een afdekkende kleilaag (deze zorgt voor een reststerkte na het initieel bezwijken van de bekleding)
- de hoogte en de helling van de taluds

#### **4.3.2. Belasting**

Erosie van het land- en/of riviertalud dient enkel te worden onderzocht als de belasting groot genoeg is om dit faalmechanisme in gang te zetten. Vandaar dat eerst een overzicht wordt gegeven van de belangrijkste belastingstypes voor deze faalmechanismes en kort wordt aangegeven hoe deze belasting kan worden bepaald.

##### **i. Erosie riviertalud**

De belastingsparameters die van belang zijn voor de erosie van het riviertalud zijn:

- de (langs)stroomsnelheden
- windgolven
- scheepsgolven

De grootte van deze belasting kan worden bepaald op basis van modelresultaten (1D hydrodynamische modellen, golfmodellen, ...) in combinatie met andere rekentechnieken (methode Brettschneider, Wilson, ...).

De grootte van de stroomsnelheden volgt over het algemeen uit 1D hydrodynamische modellen (hoewel voor uniforme kanalen e.d. ook andere eenvoudigere methodes kunnen worden aangewend). Dergelijke modellen en methodes leveren over het algemeen dwarsgemiddelde stroomsnelheden. Deze stroomsnelheden dienen nog te worden vertaald naar stroomsnelheden ter hoogte van de dijkbekleding. Deze laatste kunnen in vier gevallen sterk verschillen van de dwarsgemiddelde stroomsnelheden, namelijk:

- in bochten: de stroomsnelheid in de binnenbocht is minder groot dan in de buitenbocht
- bij de aanwezigheid van een schor of winterbed
- bij de aanwezigheid van scheepvaart
- bij de aanwezigheid van structuren, als stuwen, sluisen, bruggen, e.d.

In IMDC (2009) worden methodes aangereikt om rekening te houden met de eerste drie factoren.

De stroomsnelheden in de nabijheid van structuren kan zeer complex zijn. Op basis van de ontwerpnota's horende bij deze structuren kan geëvalueerd worden waar bijkomend onderzoek nodig is.

Windgolven kunnen worden berekend met golfmodellen (zoals bijvoorbeeld SWAN, Mike21 SW) of met eenvoudigere methodes zoals de methode van Brettschneider of de methode van Wilson. Over het algemeen spelen windgolven enkel een belangrijke rol waar grote strijklengtes voorkomen (bijvoorbeeld op de Zeeschelde, in overstromingsgebieden, maar ook in bochten na langere rechter stukken).

Scheepsgolven kunnen worden berekend volgens de Nederlandse methode (DIPRO, 1997) dan wel volgende de Duitse methode (Bundesanstalt für Wasserbau BAW, 2006) . Een vergelijking tussen beide methodes is terug te vinden in de literatuur (IMDC, 2009).

In IMDC (2009) werd voor de verschillende mogelijke oevermaterialen (breuksteen, schanskorven, open steenasfalt, geen bekleding, ...) nagegaan welke dimensies nodig zijn om aan bepaalde stroomsnelheids- en golfbelastingen te weerstaan. De berekende dimensies werden vervolgens vergeleken met de afmetingen van de bekledingsmaterialen die doorgaans in Vlaanderen worden toegepast (bijvoorbeeld sortering 10-60 kg voor breuksteen, schanskorven 0.4m dik, open steenasfalt van 12cm dik, ...). Uit de berekening blijkt dat bij stroomsnelheden onder 0.5m/s en significante golfhoogtes kleiner dan 0.3m zich geen erosie zal voordoen, ongeacht het toegepaste bekledingsmateriaal. Als een bekleding aanwezig is, welke ook, kunnen de waarden

zelfs worden opgetrokken tot 1 m/s en 0.8m. Onder deze waarden dient het faalmechanisme 'erosie van het landtalud' dus normalerwijze niet te worden onderzocht.

Bij hogere waarden speelt de toegepaste bekleding een rol. De maximaal toelaatbare waarden bij een 'normale' dimensionering worden samengevat in onderstaande tabel.

*Tabel 9: Maximale golfhoogte en stroomsnelheid in functie van de bekleding.*

bekledingsmateriaal	maximale significante golfhoogte	maximale stroomsnelheid
gras	0.8m	1.5m/s
doorgroeitiegels	0.8m	3m/s
OSA	1m (tot 1.5m bij een talud van 12:4 of flauwer)	>5m/s
betonplaten	1m	>5m/s
gepenetreerde breuksteen	1m (tot 1.5m bij een talud van 12:4 of flauwer)	>5m/s
schanskorven	1m	>5m/s
ecologische oeverinrichting	0.5m	1m/s
damplanken	- (*)	- (*)

(\*) damplanken kunnen in principe bij een correcte plaatsing elke hydraulische belasting weerstaan.

Op basis van plannen, terreinonderzoek zal dus moeten worden nagegaan of standaard materiaalafmetingen werden gebruikt en of de waarden uit vorige tabel kunnen worden overgenomen. Het niet-destructief onderzoek kan ook gebruikt worden om deze afmetingen te bepalen.

Blijft men voor de betreffende bekleding onder deze waarden dient het faalmechanisme 'erosie van het riviertalud' in principe niet verder te worden onderzocht.

## ii. Erosie landtalud

Erosie van het landtalud wordt veroorzaakt door golfoverslag en/of overloop. Het overloopdebiet wordt bepaald door de vergelijking van het toetspeil en het kruinpeil van de dijk. Voor het overslagdebiet zijn bijkomend ook de windgolfkarakteristieken van belang. Zoals in vorige paragraaf aangegeven, kunnen deze laatste worden bepaald via modellering of andere meer eenvoudige methodes. Formules voor de berekening van het gemiddeld overslagdebiet op basis van waterpeil en golfkarakteristieken zijn terug te vinden in literatuur (IMDC i.s.m. TTE & J. Maertens, 2010).

Als het gemiddeld overslagdebiet lager blijft dan 10 l/m/s en de dikte van de overstortende laag kleiner dan 25cm dan bestaat er geen gevaar op erosie van het landtalud. Bij een grotere belasting hangt de erosiebestendigheid af van de aard van het bekledingsmateriaal, zie Tabel 10.

*Tabel 10: Maximale waarden voor het gemiddeld overslagdebiet en de dikte van de overstortende laag i.f.v. de bekleding.*

bekledingsmateriaal	Gemiddeld overslagdebiet	Dikte overstortende laag
Gras met normaal beheer	10 l/s/m	25 cm
Erosiebestendig gras	50 l/s/m	40 cm
Grasbetontegels	50 l/s/m	40 cm
Open steenasfalt	- (*)	- (*)

(\*): Open steenasfalt kan in principe bij een correcte plaatsing zeer grote hydraulische belastingen aan. De stroomsnelheden dienen beperkt te blijven tot 6 à 7 m/s.

### **4.3.3. Toepassing van het niet-destructief onderzoek**

Bij de beoordeling van dit faalmechanisme kunnen de volgende niet-destructieve onderzoekstechnieken een rol spelen:

#### **i. Plaatbekleding aan landzijde en aan rivierzijde boven water**

##### *Grond Penetratie radar*

Tijdens het onderzoek werd aangetoond dat met deze techniek de dikte van een asfaltbekleding kan worden bepaald. Het opsporen van dunne plekken in het asfalt is zeker haalbaar met deze methode. Er werden in deze opdracht geen proeven uitgevoerd op andere plaatbekledingen (zoals betonplaten), maar uit literatuur blijkt dat, als deze platen ter plaatse werden gestort en dus geen wapening bevatten, deze techniek ook daar bruikbaar is. Bovendien is de techniek in staat holtes onder de bekleding op te sporen.

Deze techniek is bruikbaar aan landzijde. Aan rivierzijde is deze techniek enkel bruikbaar voor het gedeelte boven water en enkel bij aanwezigheid van zoet water (dus niet in het brakke gedeelte van de Zeeschelde). Bij de beoordeling van een plaatbekleding aan landzijde dient men er rekening mee te houden dat de afdekking met teelaarde de metingen kan verstoren.

De metingen van de grondradar moeten worden gekalibreerd. Deze techniek moet dus steeds worden uitgevoerd in combinatie met andere geotechnische meetmethoden, bijvoorbeeld door het nemen van kernstalen.

Door het gezamenlijk toepassen met de grondradartechniek, kan de toepassing van de overige geotechnische middelen echter gericht en efficiënter worden uitgevoerd.

#### **ii. Bekleding aan rivierzijde onder water**

##### *De side scan sonar en de sector scanner*

Beide akoestische methodes kunnen uitstekend worden ingeschakeld voor de beoordeling van het onder water gedeelte van de bekleding aan rivierzijde. De technieken zijn zowel bruikbaar voor een feitelijke beoordeling van het faalmechanisme (aard en dimensies van de bekleding) als voor een controle of het faalmechanisme reeds is geïnitieerd (zonder evenwel aanleiding te hebben gegeven tot een volledig bezwijken van de dijk).

Inzicht in de dimensies van de bekleding wordt enkel verkregen voor losgestorte of verpakte bekledingen (breuksteen, schanskorven, ...) al dan niet geheel of gedeeltelijk gepenetreerd. Voor plaatbekledingen (asfalt, betonplaat) en gezette bekledingen geeft de techniek enkel inzicht in de toestand waarin de bekleding zich bevindt (verzakkingen, verschuivingen, ...).

Deze techniek laat ook toe de plaatsten aan te duiden waar sedimentatie optreedt of waar de rivier een sterk schurende werking heeft op de rivier. Ze geeft dus indirect een aanduiding voor (een deel van) de heersende belasting (met name de locale stroomsnelheid).

#### **iii. De eventuele aanwezigheid en de dikte van een kleiige toplaag**

De frequentie domein EM techniek (bijvoorbeeld EM31) levert resultaten die een gemiddelde zijn voor het bovenste deel van het dijklichaam (ongeveer 6m). De resolutie van de resistiviteitsstomografieën is over het algemeen te klein om deze relatief dunne toplaag waar te nemen (tenzij een zeer korte elektrodenafstand zou worden gebruikt) en de grondradarsignalen worden in de kleiige toplaag gedempt. De capacitief gekoppelde resistiviteitsmeter geeft echter wel een aanduiding over de aanwezigheid en de dikte van een kleiige toplaag. Ook literatuur geeft aan de deze methode gebruikt kan worden om ondiepe kleien op te sporen.

Voor dijken met een zandige kernopbouw kan dus, als op basis van de heersende hydraulische belasting de vrees bestaat op microinstabiliteit, de capacitief gekoppelde resistiviteitsmeting worden toegepast. Dit kan eventueel gebeuren in combinatie met een aantal ondiepe handboringen. Er dient opgemerkt dat deze resistiviteitsmetingen moeten gebeuren aan landzijde en aan rivierzijde (niet op de kruin). Vooral aan rivierzijde kan het door de aanwezigheid van een breuksteenbekleding vaak moeilijk zijn deze techniek toe te passen.

Voor dijken met een eerder kleiige kernopbouw is de aanwezigheid van een toplaag niet van belang en dient dit dus niet verder te worden onderzocht.

#### **iv. Kernopbouw**

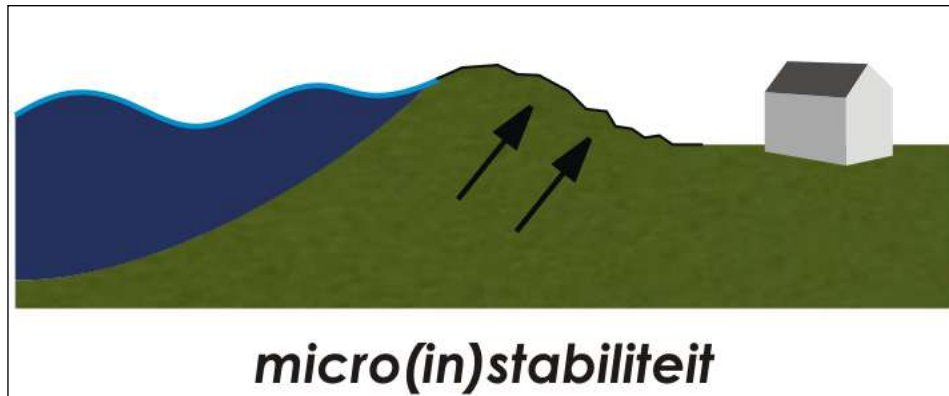
Voor de beoordeling van de reststerkte (geleverd hetzij door de kleiige toplaag op een zandkern, dan wel door de kleiige opbouw van de dijk zelf) is kennis van het materiaal van de dijkkern (eerder zandig dan wel kleilig) van groot belang. Zoals besproken bij het faalmechanisme 'macrostabiliteit' kan hiervoor een beroep worden gedaan op resistiviteitstomografie en de EM31 methode.

## 4.4. Microstabiliteit

### 4.4.1. Beschrijving

Het betreft lokale instabiliteiten die zich kunnen voordoen zowel aan landzijde als aan rivierzijde. De drijvende kracht is het drukverschil tussen de waterlijn in de dijk en daarbuiten. Dit fenomeen kan zich dus enkel voordien in geval van een waterdichte plaatbekleding of in geval van een waterdichte kleiige toplaag op een zandige dijk kern. Na het afdrücken van de toplaag op een zandige kern kan dit faalmechanisme aanleiding geven tot zandmeevoerend wellen in het dijklichaam (niet te verwarren met piping).

Het faalmechanisme wordt schematisch voorgesteld in Figuur 51.



Figuur 51: Schematische voorstelling micro(in)stabiliteit landtalud.

De weerstand van de dijk tegen dit faalmechanisme wordt verzekerd door de dikte en gewicht van de waterdichte laag.

### 4.4.2. Belasting

Net zoals bij macrostabiliteit vormt voor microstabiliteit de freatische lijn de belangrijkste belasting. Deze kan worden geschat (bijvoorbeeld aanname lineair verloop) of berekend.

Er kan worden aangetoond (IMDC i.s.m. TTE & J. Maertens, 2010) dat microstabiliteit aan landzijde niet kan optreden als het waterpeilverschil aan weerszijden van de dijk kleiner is dan 3m.

Voor de microstabiliteit aan rivierzijde kunnen mag het waterpeilverschil aan weerszijden niet groter zijn dan 1.5m. Voor niet getijgebonden waterlopen of waterwegen is dit peilverschil het verschil tussen het grondwaterpeil en het te toesten laagpeil op de waterloop/waterweg. Voor getijgebonden waterlopen wordt i.p.v. het grondwaterpeil het peil van GHW genomen vermeerderd met 0.5m

Sowieso moet bij hellingen steiler dan 8:4 dit faalmechanisme alleszins verder worden onderzocht.

#### **4.4.3. Toepassing van het niet-destructief onderzoek**

Het faalmechanisme 'microstabiliteit' lijkt zeer sterk op het faalmechanisme 'erosie'. Het verschil tussen beide wordt hoofdzakelijk gevormd door de drijvende kracht achter het mechanisme (stroomsnelheden en golfwerking bij erosie, freatische drukverschillen bij microstabiliteit) en door het feit dat microstabiliteit zich enkel kan voordoen bij ondoorlatende lagen.

Het effect op de bekleding is echter gelijkaardig (hoewel erosie zich in eerste instantie eerder lokaal zal voordoen door het verplaatsen of verwijderen van delen van de bekleding en microstabiliteit zich zal voordoen onder de vorm van kleine afschuivingen).

De toepassing van het niet-destructief onderzoek bij de beoordeling van dit mechanisme is dan ook zeer gelijkaardig aan de toepassing bij het faalmechanisme 'erosie'.

De dikte van de plaatbekleding kan worden bepaald aan de hand van grondradarmetingen in combinatie met het nemen van een beperkt aantal kernstalen. Opnieuw dient rekening te worden gehouden met de eventueel storende invloed van een laag teelaarde boven de plaatbekleding.

De aanwezigheid en de dikte van een kleiige toplaag op een zandige dijk kern kan worden gemeten met een capacitef gekoppelde resistiviteitsmeting eventueel in combinatie met een beperkt aantal ondiepe handboringen. Op basis van resistiviteitstomografieën en/of EM31 metingen kan men de aard van het kernmateriaal nagaan, op basis waarvan kan worden besloten deze technieken uit te voeren.

Als het faalmechanisme zich reeds heeft voorgedaan aan landzijde (bijvoorbeeld gedeeltelijk afdrukken van de kleilaag) zonder dat de dijk daarom reeds bezweken is, kan via de techniek van 'spontane polarisatie' worden vastgesteld of zich inderdaad doorsijpeling doorheen de dijk voordoet. Deze doorsijpeling is in droge periodes ook vaak visueel waarneembaar.

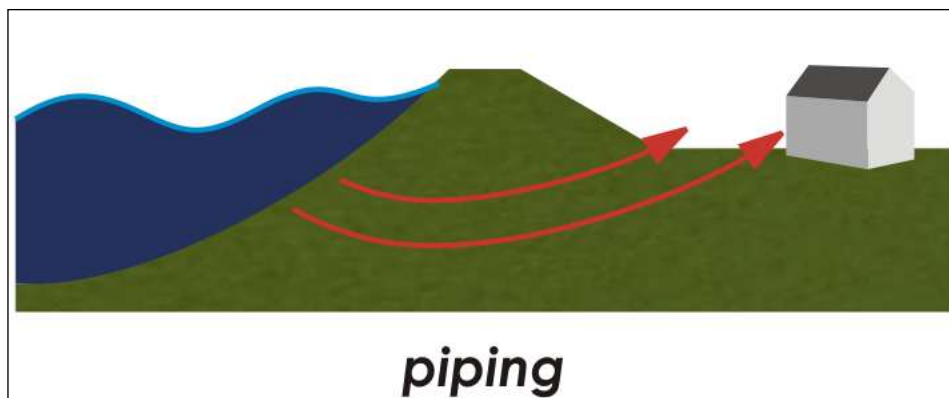
Als het faalmechanisme zich reeds heeft voorgedaan aan rivierzijde, kan dit eventueel waargenomen worden op de side scan sonar en de sector scanner doordat de breukstenen samen met de kleilaag lokaal zijn afgeschoven.



## 4.5. Piping

### 4.5.1. Beschrijving

Het gaat hier over zandmeevoerend wellen in een zandlaag onder de dijk. De aandrijvende kracht is hier dus niet de stroming in de freatische lijn in de dijk, maar de stroming onder de dijk. Het faalmechanisme wordt schematisch voorgesteld in Figuur 52.



Figuur 52: Schematische voorstelling van het faalmechanisme piping.

De sterkte (of zwakte) van de dijk wordt in eerste instantie bepaald door de breedte van de dijk ter hoogte van de teen. Als de verhouding tussen deze lengte ( $L_d$ ) en het waterpeilverschil tussen rivier- en landzijde ( $dH$ ) groter is dan 18 kan piping zich zeker niet voordoen en moet dit faalmechanisme niet verder worden onderzocht. Deze voorwaarde volgt uit de vereenvoudigde formule van Bligh.

$$\frac{L_d}{dH} > 18$$

Als niet aan deze voorwaarde is voldaan; kan piping zich voordoen als:

- de dijk zelf relatief ondoorlatend is, en onder de dijk zich een zandlaag bevindt
- en deze zandlaag zich aan landzijde relatief ondiep onder de polderklei bevindt

Gevoelige dijken worden dus gekenmerkt door de aanwezigheid van een zandlaag die niet erg diep gelegen is onder een eerder kleiige dijk.

### 4.5.2. Toepassing van het niet-destructief onderzoek

Op basis van resistiviteitstomografieën en/of EM31 metingen kan worden nagegaan of het dijklichaam eerder kleiig dan zandig is. Bij een zandige opbouw dient het faalmechanisme 'piping' niet verder te worden onderzocht (dan bestaat wel het gevaar op zandmeevoerend wellen in het dijklichaam, zie het faalmechanisme 'microstabiliteit').

Als op basis van de resistiviteitstomografie en/of de EM31 metingen blijkt dat het dijklichaam eerder kleiig is, moet verder worden onderzocht of er zich onder het dijklichaam een zandlaag bevindt. Dit kan niet gebeuren op basis van de EM31 metingen, aangezien de resultaten hiervan een gemiddelde zijn voor de bovenste 6 m van de dijk. Het optreden van een zandlaag onder een kleilaag in de gesatureerde zone kan meestal ook niet onderscheiden worden op de resistiviteitstomografie. Eén van de redenen hiervoor is dat bij de meting die een diepere invloed zou moeten hebben, de stroom preferentieel door de goed geleidende kleilaag zal lopen en dus voornamelijk die invloed zal voelen.

Als men op basis van de hydraulische belasting, de dijkgeometrie en de aard van het kernmateriaal voor piping vrees, is het dus aangewezen de hierboven beschreven niet-destructieve methodes te combineren met andere geotechnische technieken, zoals sonderingen en/of boringen. Ook de MASW techniek (meerkanaals analyse van oppervlaktegolven) zou kunnen worden ingezet voor het detecteren van de diepere zandlagen. Deze techniek werd echter nog maar op beperkte schaal getest.

## 4.6. Zettingen

### 4.6.1. Beschrijving

Zetting is het proces waarbij grond onder invloed van een belasting (eventueel het eigengewicht) wordt samengedrukt.

Het voorkomen van zettingen is geen faalmechanisme in de strikte zin van het woord. Waar de faalmechanismen zoals hierboven beschreven eerder te maken hebben met het overschrijden van een grenstoestand, zijn (grote) zettingen eerder te aanzien als een overschrijding van een bruikbaarheidstoestand. Indirect kunnen zettingen echter aanleiding geven tot falen (door de lagere kruinhoogte bestaat er een grotere kans op overloop en/of golfoverslag) en daarom zal bij dijkwerken met deze zettingen rekening moeten worden gehouden (bijvoorbeeld door het voorzien van een zekere overhoogte).

Eendimensionale zettingen kunnen vereenvoudigd worden berekend met de logaritmische samendrukkingswet van Terzaghi. Deze stelt dat de zetting evenredig is met het logaritme van de spanningsverandering en omgekeerd evenredig met de samendrukkingsconstante. In onderstaande tabel worden voor een aantal materialen richtwaarden gegeven voor deze dimensieloze samendrukkingsconstante.

Tabel 11: Samendrukkingsconstante (volgens natuurlijk logaritme)

Grondsoort	C
Zand	50-500
Silt	25-125
Klei	10-100
Veen	2-25

### 4.6.2. Toepassing van het niet-destructief onderzoek

De waarde voor de samendrukkingsconstante in deze tabel heeft slechts een oriënterende betekenis en de samendrukbaarheid kan sterk variëren binnen eenzelfde grondsoort, maar de tabel geeft toch een indicatie van de verhouding tussen de verschillende grondsoorten.

Voor het bepalen van zettingen is dus vooral de aanwezigheid van (slappe) klei en veen van groot belang.

Op basis van resistiviteitstomografieën eventueel in combinatie met de EM31 techniek kan de aanwezigheid van klei in de niet-verzadigde zone worden vastgesteld.

Omdat de samendrukbaarheid sterk kan variëren binnen dezelfde grondsoort dienen deze niet-destructieve methodes minstens punctueel te worden aangevuld met andere geotechnische technieken zoals sonderingen en/of boringen.

De MASW-techniek (meerkanaals analyse van oppervlaktegolven) zou ook kunnen worden ingezet voor de inschatting van de samendrukbaarheid. De ervaring met deze techniek is echter relatief beperkt. Ontwikkelingen hierrond zijn nog aan de gang.

#### **4.7. Andere**

Voor de bepaling van de dijkinstabiliteit in het algemeen is de ligging van bijzondere elementen van groot belang. Hierbij wordt in de eerste plaats gedacht aan de aanwezigheid van (stalen) damplanken. Deze damplanken hebben een belangrijke invloed zowel op de macrostabiliteit als op microinstabiliteit (voorkomen van zandmeevoerende wellen) en eventueel op piping. Ze spelen dus ook een rol in de dwarse structuur van de dijk (zie ook §4.2.12).

De ligging van oudere damplanken is niet steeds gekend. Deze metallische structuren zijn goed waarneembaar op de elektrische tomografieën en op de in fase component van de EM31 metingen.

Voor het ontwerp en de uitvoering van dijkwerken is het van belang de aanwezigheid van oude structuren en leidingen in de dijk te kennen. Ook hier kunnen de twee hierboven vermelde meettechnieken gegevens leveren aanvullend op plannen beschikbaar bij de dijkbeheerders en de nutsmaatschappijen.

## 5. SAMENVATTING

### 5.1. Inzetbaarheid en betrouwbaarheid van de methoden

#### *Geo-elektrisch: Resistiviteitstomografie*

- Resistiviteitstomografie is een geo-elektrische methode waarbij de schijnbare resistiviteit van de bodem gemeten wordt. Door inversie wordt een bodemmodel van de resistiviteit opgesteld.
- De resolutie en diepte van de meting wordt gekozen in functie van het beoogde resultaat, binnen bepaalde grenzen.
- De methode is vrij algemeen inzetbaar, maar wordt voornamelijk beperkt door de aanwezigheid van oppervlakkig stenig materiaal, of asfaltlagen, waardoor het contact met de bodem niet mogelijk is. Gebruik van zout water aan de elektroden zorgt voor beter elektrisch contact. Het gebruik ervan is ten allen tijde aan te raden, maar zeker indien de bodem droog is.
- Steenbestorting aan rivierzijde heeft dan ook tot gevolg dat ingemeten profielen dwars over de dijk over het algemeen kort zijn, en dus weinig penetratie hebben.
- De resultaten tonen aanzienlijke resistiviteitsvariaties binnen en onder het dijklichaam aan, met waarden tussen 1 en 1000 ohm.m. Het dijklichaam wordt voornamelijk gekenmerkt door hoge tot middelmatige resistiviteit; dieper worden lage waarden waargenomen.
- Het resistiviteitsmodel wordt voor interpretatie gecombineerd aan geotechnische (CPT's) en/of sedimentologische gegevens (boringen).
- Boven de watertafel komen hoge resistiviteitswaarden overeen met zandig tot stenig materiaal; gemiddelde waarden wijzen op een lemige bodem; lage waarden tonen de aanwezigheid van klei of venige klei aan.
- Onder de grondwatertafel kan over het algemeen geen onderscheid tussen zand, leem of klei gemaakt worden.
- Invloed van het getij op de meetresultaten werd niet vastgesteld
- Vermoedelijke micro-instabiliteit te Hingene door doorstroming door de dijk, heeft geen anomalie in de gegevens teweeg gebracht.
- Een zone van macro-instabiliteit te Walem wordt wel gekenmerkt door lage resistiviteitswaarden en komt overeen met de aanwezigheid van slappe klei in het dijklichaam.
- Er blijkt een goede correlatie mogelijk tussen resistiviteitsbeeld en CPT's. Bijgevolg kan de meting gebruikt worden om CPT gegevens te inter- of extrapoleren.

#### *Geo-elektrisch: Spontane polarisatie*

- Spontane polarisatie is een elektrochemisch verschijnsel dat optreedt door ondergrondse processen zoals redoxreacties en grondwaterstroming (ionair transport). Deze processen veroorzaken potentiaalverschillen in de bodem, die aan het oppervlak meetbaar zijn.
- Aan het oppervlak wordt het potentiaalverschil tussen een stationaire referentie-elektrode en een mobiele meetelektrode opgenomen langs een profiel.
- Anomalieën in het signaal wijzen op elektrochemische reacties.
- Ruis kan ontstaan bij rechtstreeks contact van de elektrode met ondiep stenig materiaal.
- De methode is kwalitatief, de gevoeligheid (dieptebereik, sterkte stroming) is niet gecombineerd.
- Te Hingene heeft deze methode een anomalie getoond ter hoogte van de vermoedelijke micro-instabiliteit; de resistiviteitsmeting had hier niets aangetoond.
- De methode kan ingezet worden ter controle op of bevestiging van doorstroming bij vermoeden van micro-instabiliteit.
- Verdere evaluatie en/of ontwikkeling kan leiden tot een gecombineerd en efficiënte methode.

*Elektromagnetisch: Capacitief gekoppelde resistiviteitsmeter (Ohm Mapper)*

- De methode houdt in dat de schijnbare resistiviteit van de bodem wordt gemeten met gebruik van twee dipoolantennes waarvan één fungeert als zender en één als antenne. Alhoewel een elektrische eigenschap van de bodem wordt gemeten, is de methode in feite elektromagnetisch.
- Er is geen geleidingscontact tussen instrument en bodem vereist, dus de methode kan toegepast worden op asfalt bedekking.
- Door de meting langs een profiel te herhalen met toenemende antenneseparaties, wordt de schijnbare resistiviteit met toenemend dieptebereik bepaald.
- Het meetresultaat is in principe equivalent met dat van resistiviteitstomografie. Na inversie wordt eveneens een resistiviteitsbeeld van de bodem bekomen.
- De methode is efficiënter dan resistiviteitstomografie, maar de bereikte resultaten hebben een lager dieptebereik. De aanwezigheid van kleien of andere geleiders verstoort de meting.
- De betrouwbaarheid is onzeker: in deze studie blijkt een kwalitatief goede overeenkomst met resistiviteitstomografie (de waarden zelf zijn verschillend). Langsheen het profiel is bovendien een hogere resolutie bereikbaar. Andere studies hebben de mogelijk slechte overeenkomst met resistiviteitstomografie aangetoond.

*Elektromagnetisch: Grondradar, laag- tot middenfrequent (< 800 MHz)*

- Beeldvorming in profiel door middel van uitsturen en opname van elektromagnetische impuls.
- Reflecties komen voor als gevolg van diëlektrische contrasten.
- Toepassingsgebied van laag- tot middenfrequente radars situeert zich voor de geologie en bodemkunde in het in kaart brengen van laagstructuren en breuken.
- Metingen op dijken tonen de zeer lage penetratiegraad van het signaal aan, te wijten aan de klei aanwezig in de zanden, afdekkingen en dijkkernen.
- Dit type grondradar is niet algemeen inzetbaar voor het in kaart brengen van de inwendige structuren van dijken.

*Elektromagnetisch: Grondradar, hoogfrequent (> 800 MHz)*

- Principe is identiek aan dat van laag- tot middenfrequente radar.
- Toepassingsgebied van dit type radar situeert zich in de technische toepassingen: controle van dikte en structuur van beton, asfalt, wapening, leidingen, ...
- Metingen op dijken tonen dat indien geen bodemlaag op de asfalt bekleding aanwezig is, de structuur goed in beeld gebracht wordt. Bij een dikke bodemlaag is de inzetbaarheid lager.
- Er zijn geen holtes aangetroffen tijdens de metingen, maar in principe kan de techniek ook deze opsporen.
- Een belangrijke beperking van de methode is dat de bekleding aan rivierzijde niet kan gecontroleerd worden indien het rivierwater brak of zout is.
- De methode mag als betrouwbaar en inzetbaar beschouwd worden voor de controle van dijkbekledingen, rekening houdend met bovenvermelde beperking.

*Elektromagnetisch: Frequentiedomein elektromagnetisme (EM31)*

- Het principe van de meting is gebaseerd op de elektromagnetische inductie: een primair elektromagnetisch veld induceert stromen in geleidende bodem waardoor een secundair elektromagnetisch veld ontstaat. Het resulterende veld (som van primair en secundair) wordt gemeten.
- Het gemeten veld staat in verhouding tot de schijnbare geleidbaarheid (of resistiviteit) van de bodem.
- Het ingezette toestel (Geonics EM31) had een invloedssfeer tot ongeveer 6 m diep.

- Geleidende objecten in de nabijheid (< 6 m) verstoren de meting.
- De gemeten waarden staan goed in verhouding tot de resultaten bekomen met de resistiviteitstomografie.
- Het toestel is goed geschikt voor de verkenning van dijken: de opsporing van veranderende dijkopbouw werd bewezen; de meetwaarden kunnen een indicatie geven van de gebruikte materialen; ondergrondse geleiders (damplanken, leidingen) kunnen opgespoord worden.
- Er kan overwogen worden om CPT campagnes vooraf te laten gaan door een FDEM (EM31) verkenning om de positionering van CPT's bij te sturen in functie van de heterogeniteit van het ontvangen signaal.

#### *Seismisch: P-golven refractie*

- De meting bepaalt de voorplantingssnelheid van longitudinale compressiegolven (P-golven).
- De snelheidsmeting van diepere lagen is gebaseerd op het verschijnsel van kritische refractie.
- Na inversie wordt een P-golf snelheidsmodel bekomen.
- Een beperking van de methode houdt in dat enkel snelheidstoenames worden geregistreerd.
- De ondiepe bodem vertoont een lage snelheid; met de diepte neemt de snelheid toe.
- Het bekomen beeld heeft weinig detail en de snelheden zijn lager dan verwacht (grondwatertafel?)
- Eventueel inzetbaar als aanvullende methode.

#### *Seismisch: S-golven refractie*

- Principe gelijkaardig als voor P-golven refractie. S-golven zijn transversale schuifgolven.
- Er zijn bijkomende problemen ten opzichte van P-golf refractie.
- Deze zijn:
  - De opwekking van S-golven is veel complexer en minder consistent dan P-golven
  - Er treedt conversie op van S-golven naar snellere P-golven (en omgekeerd) waardoor de opgemeten aankomsttijden onbetrouwbaar zijn.
- Alhoewel S-golf snelheden een hoge geotechnische relevantie hebben, kan S-golven refractie niet aangeduid worden als een betrouwbare methode voor toepassing op dijken.

#### *Seismisch: Meerkanaals analyse van oppervlaktegolven*

- De methode is gebaseerd op de dispersieve eigenschappen van oppervlaktegolven, in dit geval Rayleigh golven.
- Na berekening van de dispersiecurve (verandering van de golfsnelheid in functie van de frequentie) wordt deze geïnverteerd met een S-golf snelheidsprofiel als resultaat. Op dit ogenblik bestaan enkel 1D-inversie modellen.
- De test binnen deze studie had betrekking op de MASW processing van gegevens opgenomen voor refractiedoeleinden. Aangepaste geofonen (detectoren) kunnen leiden tot diepere resultaten.
- Verlaging van de S-golf snelheid met toenemende diepte kan opgelost worden, in tegenstelling tot refractiemetingen.
- De meting zelf is robuust en betrouwbaar. De methode is wel gevoelig aan 2D/3D variaties in de bodem. Verdere evaluatie van de methode is aangeraden om dit fenomeen te begroten.
- De resultaten zijn redelijk succesvol en tonen een aantal overeenkomsten met de interpretatie op basis van CPT gegevens. Vooral de correlatie van lage-snelheidszones met veenhoudende kleilagen is interessant.
- De methode behoeft bijkomende ontwikkeling en testen op de dijk om de betrouwbaarheid te evalueren, maar heeft een hoog potentieel. Moderne inversieroutines laten toe betrouwbare resultaten te bekomen, als antwoord op de niet-uniciteit inherent aan elk inversieproces.

*Akoestisch: Side scan sonar (onder water)*

- Het principe is gebaseerd op het uitsturen en reflecteren van akoestische pulsen.
- Door opeenvolgende pulsen, wordt als het ware een akoestische foto van het onderwaterlandschap gemaakt.
- Het resultaat laat toe de geometrie en stabiliteit van de rivierbodem te evalueren en sedimentologische processen te identificeren.
- Structuren zijn over het algemeen goed herkenbaar.
- Side scan sonar is een courant toegepaste techniek en is betrouwbaar.

*Akoestisch: Sector scanner (onder water)*

- De sector scanner meet de geometrie van de rivierbodem door het uitsturen en ontvangen van een gefocuste akoestische impuls. De scannerkop is gemonteerd op een zwenkend hoofd zodat een profiel wordt opgemeten.
- Het resultaat laat toe onregelmatigheden zoals verzakte betonplaten te lokaliseren.
- Sector scanner is een courant toegepaste techniek en is betrouwbaar.

*Bewezen technologie / methoden*

Binnen de studie zijn een aantal zeer courante methoden niet ingezet geworden omdat ze als bewezen technologie of methode worden beschouwd. Hieronder rekenen we als metingen op land de magnetische gradiometrie (detecteren van ferromagnetische metalen (ijzer)), tijds-domein elektromagnetische metingen (het detecteren van metalen (in het algemeen)). Onder water is de multibeam bathymetrie inzetbaar. De methoden zijn opgenomen in de overzichtstabel op volgende pagina.



## Overzicht

Inzetbaarheid en betrouwbaarheid	Methodes	Opmerkingen
Courant inzetbaar, betrouwbaar	FDEM (EM31 specifiek)	Exploratief
	Resistiviteitstomografie	Beeldvorming, calibratie met CPT's
	Hoogfrequente GPR	Controle bekleding
	Side Scan Sonar	Controle onderwatergedeelte
	Sector Scanner	Controle onderwatergedeelte
	Multibeam Bathymetrie	Bewezen technologie, onderwatermorfologie
	TDEM (EM61 specifiek)	Bewezen technologie, metaaldetectie tot 2 m
	Magnetische gradiometrie	Bewezen technologie, metaaldetectie
Hoog potentieel, verder te evalueren	MASW	Veelbelovend en hoge geotechnische relevantie: Indicatie glijmodulus, S-golfsnelheid. verder te evalueren op dijken voor 2D/3D effecten en efficiëntie.
	Spontane polarisatie	Inzetbaar voor opsporingen doorstroming dijklichaam. Verdere evaluatie voor verhoging efficiëntie en gevoeligheid.
Aanvullend	Capacitief gekoppelde resistiviteitsmeter	Aanvullend op resistiviteitstomografie, of op met asfalt beklede dijken
	Spontane polarisatie	Aanvullend, opsporing doorstroming dijken
	P-golven refractie	Indicatie compactie
Te mijden	Laagfrequente GPR	Niet standaard inzetbaar door aanwezigheid klei
	S-golven refractie	Onbetrouwbaar, diverse problemen

## 5.2. Toepasbaarheid in functie van faalmechanisme

Hieronder worden de faalmechanismen weergegeven in volgorde van belangrijkheid. Voor elk faalmechanisme wordt samengevat op basis van welke niet-destructieve technieken (eventueel in combinatie met andere technieken) de stabiliteit kan worden ingeschat.

### *Macrostabiliteit*

- Ingeval zeer flauwe taludhellingen en/of zeer geringe dijkhoogtes: in principe geen onderzoek nodig
- Bij steilere taludhellingen en/of grotere dijkhoogtes: EM31 metingen aangevuld met resistiviteitsstomografieën, zowel in de langsrichting en, indien mogelijk, in de dwarsrichting
  - Als hieruit blijkt dijk kern overwegend zandig: dan beperkt aantal sonderingen (boringen) ter controle en validatie
  - Als hieruit blijkt dijk kern overwegend kleiig: groter aantal sonderingen (boringen) voor goede inschatting consistentie klei (eventueel seismische technieken: P-golven en MASW)

### *Damplanken, leidingen, structuren in de dijk:*

- EM31 metingen
- Niet uitgevoerd in ons onderzoek, maar het bewezen nut van de magnetische gradiometrie of EM61 (Tijdsdomein EM (EM61)  $\leftrightarrow$  Frequentiedomein EM (=EM31)) kan eventueel vermeld worden. De EM31 levert natuurlijk bijkomende informatie over de geleidbaarheid van de bodem indien geen damplanken aanwezig zijn.

### *Erosie*

- als lage belasting (stroomsnelheden, wind- en scheepsgolven voor riviertalud, overloop en overslag voor het landtalud): in principe geen onderzoek nodig
- In andere geval:
  - Bekleding landtalud
    - gras: visuele inspectie van de kwaliteit van de grasmat
    - plaat/asfaltbekleding: grondradar in combinatie met kernstalen
  - Bekleding riviertalud
    - Boven water
      - gras, gestorte bekleding: visuele inspectie
      - plaatbekleding: grondradar in combinatie met kernstalen (niet bij brak water)
    - Onder water
      - side scan sonar, sector scanner
  - Reststerkte: EM31 metingen eventueel aangevuld met resistiviteitsstomografie
    - Als overwegend kleiig dijklichaam: OK
    - Als overwegend zandig dijklichaam: capacitief gekoppelde resistiviteitsmeting aan land- en rivierzijde, met eventueel lokale ondiepe handboringen

### *Microstabiliteit*

- bij flauwe taludhellingen en klein waterpeil verschil tussen land- en rivierzijde: in principe geen onderzoek nodig
- In andere geval: EM31 metingen eventueel aangevuld met resistiviteitstomografie
  - Als overwegend kleiig dijklichaam: OK
  - Als overwegend zandig dijklichaam
    - Waterdichte plaatbekleding
      - aan landzijde en aan rivierzijde boven water: grondradar (in geval zoet water)
      - aan rivierzijde: side scan sonar en de sector scanner
    - Kleiïge toplaag: capacitief gekoppelde resistiviteitsmeting aan land- en rivierzijde, met eventueel locale ondiepe handboringen
    - Algemene controle doorsijpeling aan landzijde: visueel, eventueel spontane polarisatie
    - Algemene controle rivierzijde: side scan sonar en de sector scanner

### *Piping*

- als dijkbreedte teen veel groter dan waterpeilververschil rivierzijde landzijde: in principe geen onderzoek nodig
- In het andere geval: EM31 metingen eventueel aangevuld met resistiviteitstomografie
  - bij overwegend zandige opbouw: ok
  - bij overwegend kleiïge opbouw: sonderingen (boringen), eventueel seismisch onderzoek (P-golven of MASW)

### *Zettingen*

- EM31 metingen eventueel aangevuld met resistiviteitstomografie, aangevuld met sonderingen (boringen), eventueel seismische technieken

## 6. CONCLUSIES

De studie "Evaluatie van niet-destructieve methoden, in het bijzonder geofysische methoden voor onderzoek van de bresgevoeligheid van Vlaamse dijken langs de waterwegen" (Bestek WL/07/16) heeft als doel op basis van geofysische proefmetingen, de betrouwbaarheid en inzetbaarheid van geofysische methoden toegepast op dijken te evalueren. Dit moet uiteindelijk leiden tot een monitoringvoorstel waarvan de resultaten leiden tot een geoptimaliseerd (preventief) onderhoud van de waterbouwkundige infrastructuur en tot een sturing van toekomstig gedetailleerd stabiliteitsonderzoek.

In een eerste fase van de studie (Deelopdracht 1) werden geofysische metingen uitgevoerd binnen verschillende proefsites met diverse technieken. Daarnaast werden stabiliteitsmodelleringen uitgevoerd op diverse dijkprofielen zodat de interpretaties zouden kunnen uitgedrukt worden in termen van bresgevoeligheid.

Dit rapport heeft betrekking op Deelopdracht 2 van de studie en bespreekt de inzetbaarheid en de betrouwbaarheid van de geofysische methoden. Het rapport bestaat uit twee delen: in hoofdstuk 3 worden de resultaten van de verschillende ingezette methoden samengevat en getoetst aan de beschikbare geotechnische informatie. In hoofdstuk 4 wordt per faalmechanisme nagegaan aan de hand van een reeks modelleringsresultaten welke de kritische parameters (hydraulisch, geotechnisch, ...) zijn met betrekking tot dijkstabiliteit en welke geofysische methodes kunnen ingezet worden om deze informatie te bekomen of aan te vullen. De bevindingen staan samengevat in hoofdstuk 5.

In eerste instantie kan op basis van de dijkgeometrie of hydraulische randvoorwaarden nagegaan worden of het geofysisch onderzoek van een dijk vereist is, bv. bij zwakke dijkflank hellingen zullen instabiliteiten niet optreden en is bijkomend onderzoek niet noodzakelijk. Indien de randvoorwaarden voor een bepaald faalmechanisme ongunstig zijn, levert geofysisch onderzoek bijkomend inzicht in de dijkstructuur.

Resistiviteitstomografie aangevuld met frequentiedomein elektromagnetisme, vormen een goed koppel voor het verkennen en/of in beeld brengen van het dijklichaam. De technieken laten toe een oordeel te vellen over de inwendige structuur van een dijk en zijn nuttig voor het evalueren van de macrostabiliteit. Bovendien kan een geotechnische campagne gestuurd worden in functie van de bereikte resultaten. Elektromagnetische methodes laten bovendien toe leidingen en damplanken te lokaliseren. Hetzelfde resultaat kan bereikt worden met de klassieke magnetische gradiometrie (niet ingezet binnen deze studie).

Hoogfrequente radar is succesvol inzetbaar ter controle van asfalt en betonplaat dijkbekleding, voor zoverre zout water of klei de signaalpropagatie niet verhindert.

Onder water zijn side-scan sonar, sector scanner (en multibeam bathymetrische opnames, hier niet getest) courante technieken en kunnen op elk ogenblik ingezet worden voor controle van het onderwater gedeelte van de dijk, voor zoverre de waterloop toegankelijk is.

Twee methodes werden als veelbelovend omschreven. Deze zijn de meerkanaalsanalyse van oppervlaktegolven (MASW) en spontane polarisatiemetingen (SP). De resultaten van de MASW analyse omvat S-golf snelheden die rechtstreeks in verband staan met de sterkte van de bodem (glijdingsmodulus) en dus een hoge geotechnische relevantie hebben. Om die reden wordt een verdere evaluatie van de methode aangeraden, ten dele om de invloed van nadelige 2D/3D effecten van de dijkgeometrie te begroten. Zeker naar sterkte van kleilagen, belangrijk voor de gehele dijkstabiliteit, kan dit op termijn een courant inzetbare methode worden. De SP metingen kunnen door bijkomende evaluatie ontwikkeld worden naar een meer efficiënt en daardoor gemakkelijker inzetbare methode.

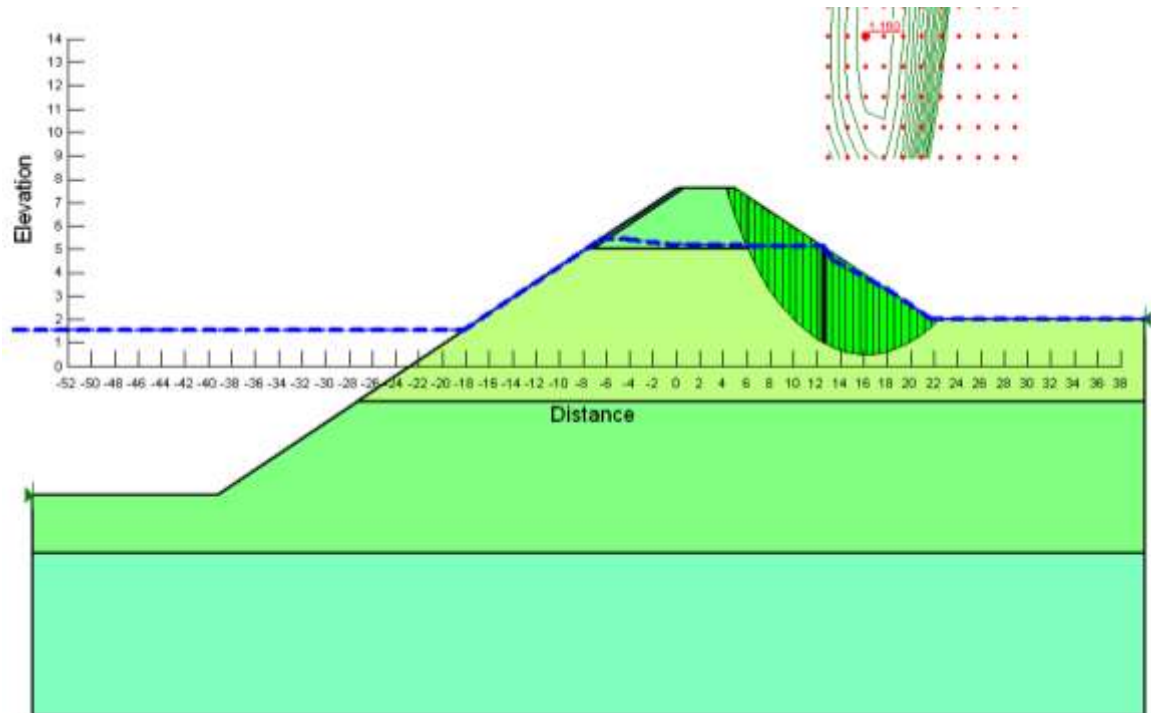
P-golven refractie kan eventueel aanvullend gebruikt worden, maar succes is niet gegarandeerd. Gezien de huidige ontwikkelingen van de analyse van oppervlaktegolven, kan het echter waard zijn deze techniek in de toekomst verder te evalueren.

Een capacitief gekoppelde resistiviteitsmeting kan voor specifieke doeleinden ingezet worden, namelijk het bepalen van ondiepe kleilagen. Ook de resistiviteitsmeting voor ondiepe zones op plaatsen waar asfalt aanwezig is, kan een aanvulling zijn op de klassieke resistiviteitstomografie..

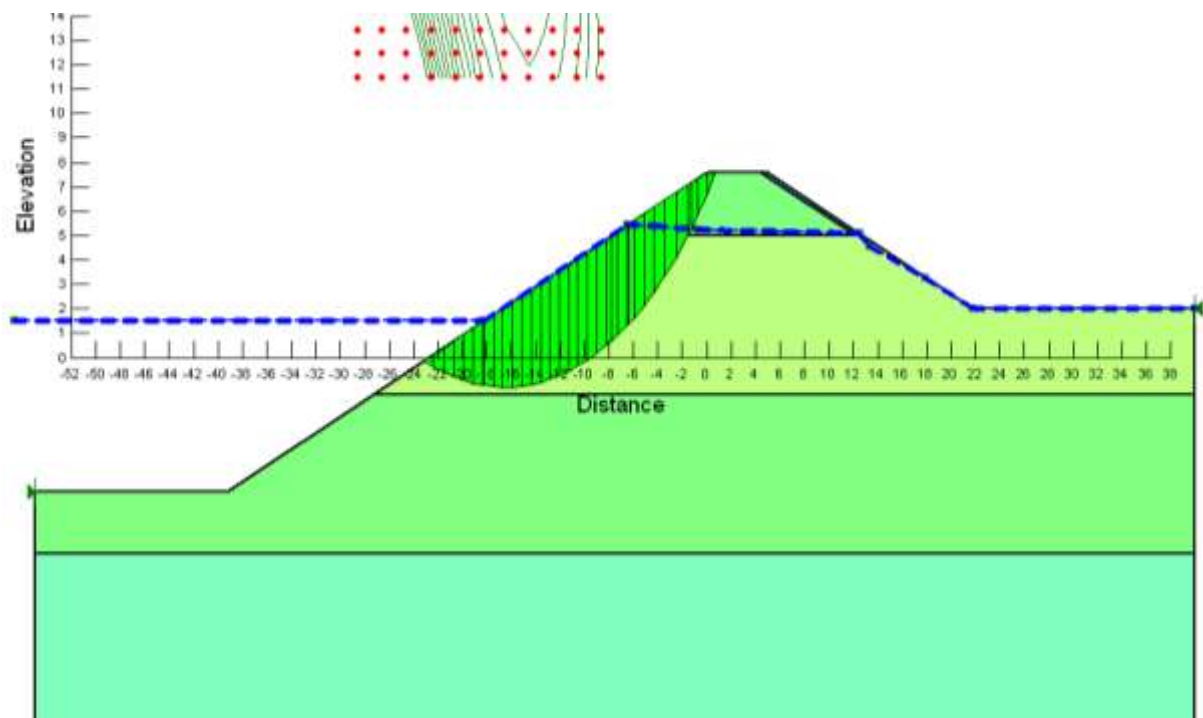
S-golvenrefractie en laag-frequente radar dienen vermeden te worden voor het in beeld brengen van dijkstructuren.

Al het voorgaande zal uitmonden in een finaal voorstel voor het monitoren van rivierdijken; de voorgestelde methoden moeten in dat geval leiden tot resultaten die toelaten om het onderhoud van de waterbouwkundige infrastructuur te optimaliseren en toekomstig gedetailleerd stabiliteitsonderzoek te sturen. Dit maakt het onderwerp uit van Deelopdracht 3.

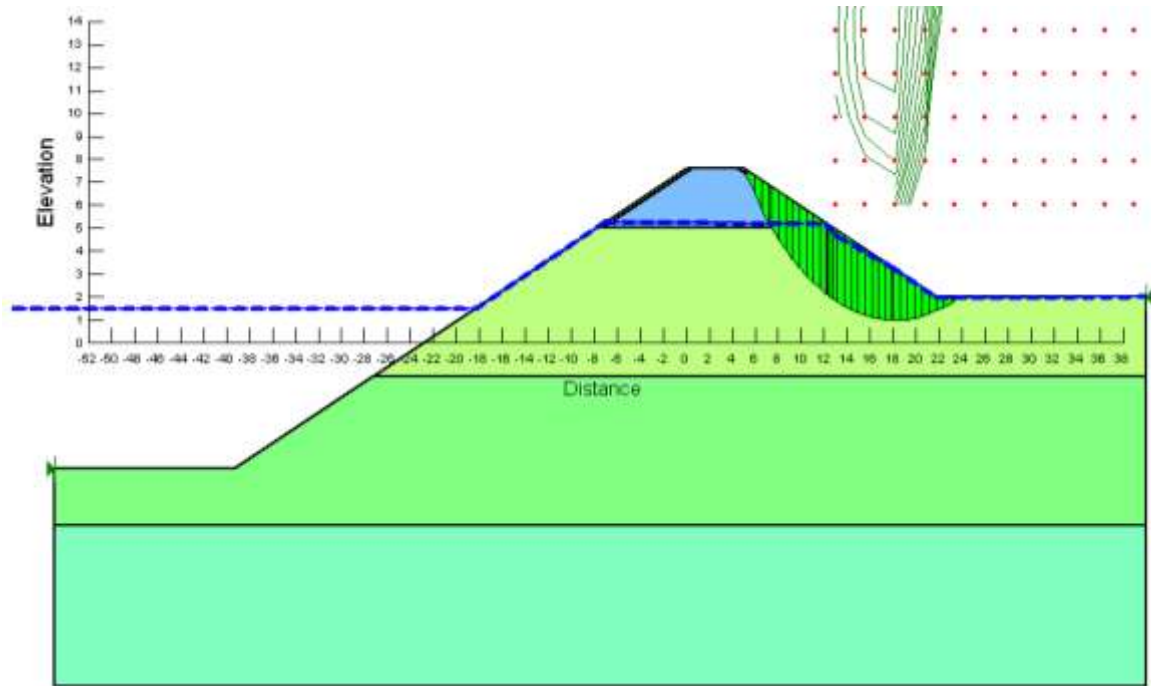
## 7. BIJLAGE



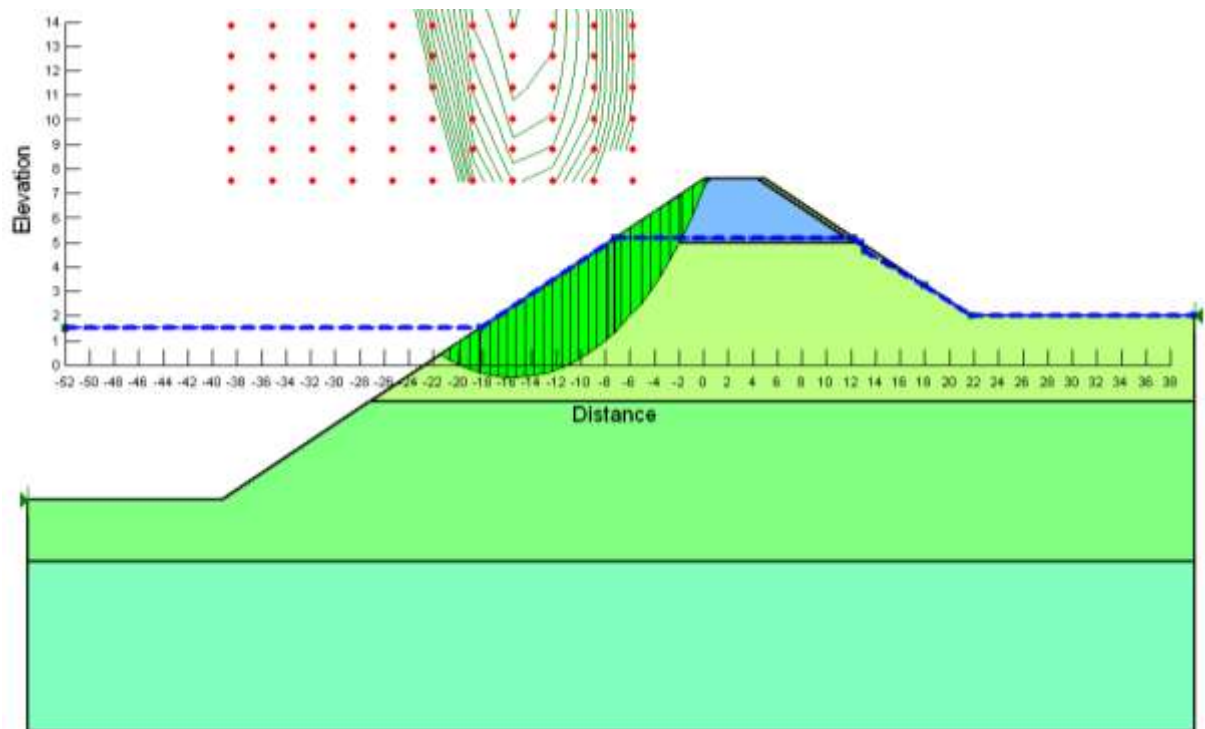
Figuur 53: Losgepakt gepakt zand. Landzijde. FOS = 1.16



Figuur 54: Losgepakt zand. Rivierzijde. FOS = 1.01

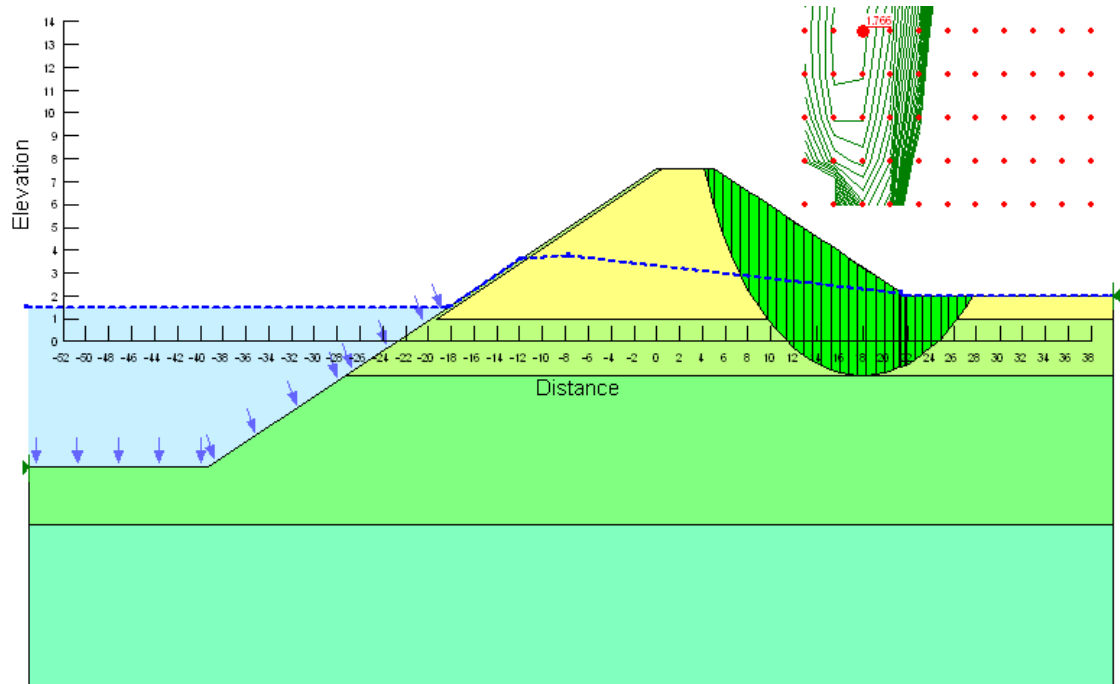


Figuur 55: Dicht gepakt zand. Landzijde. FOS = 1.16

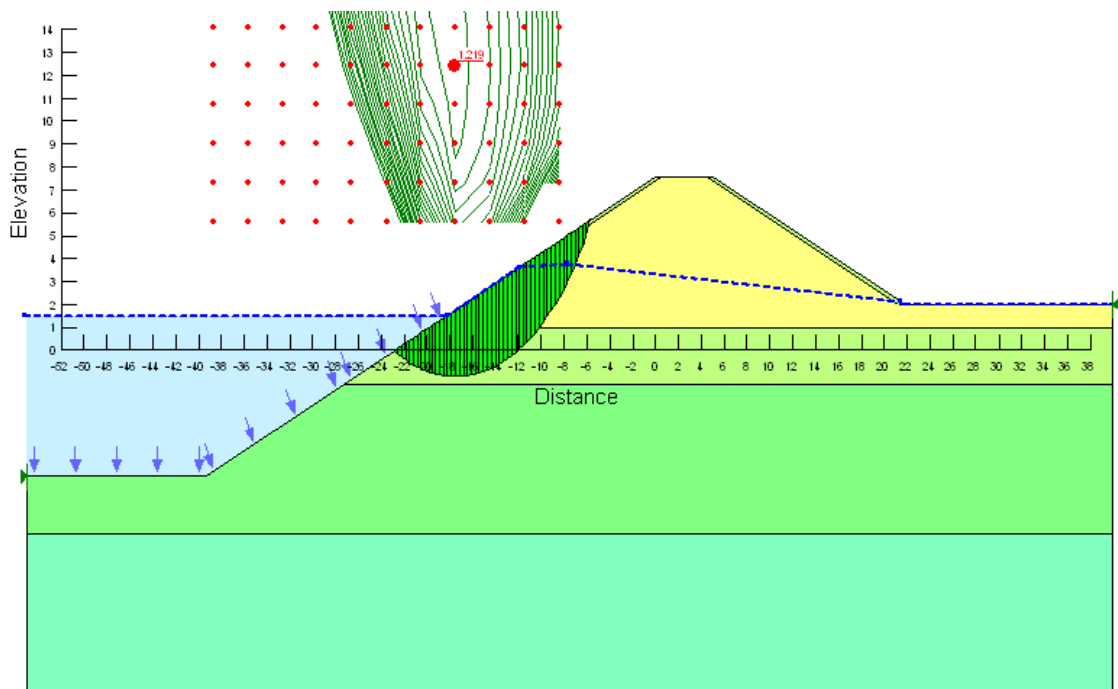


Figuur 56: Dicht gepakt zand rivierzijde. FOS = 1.02

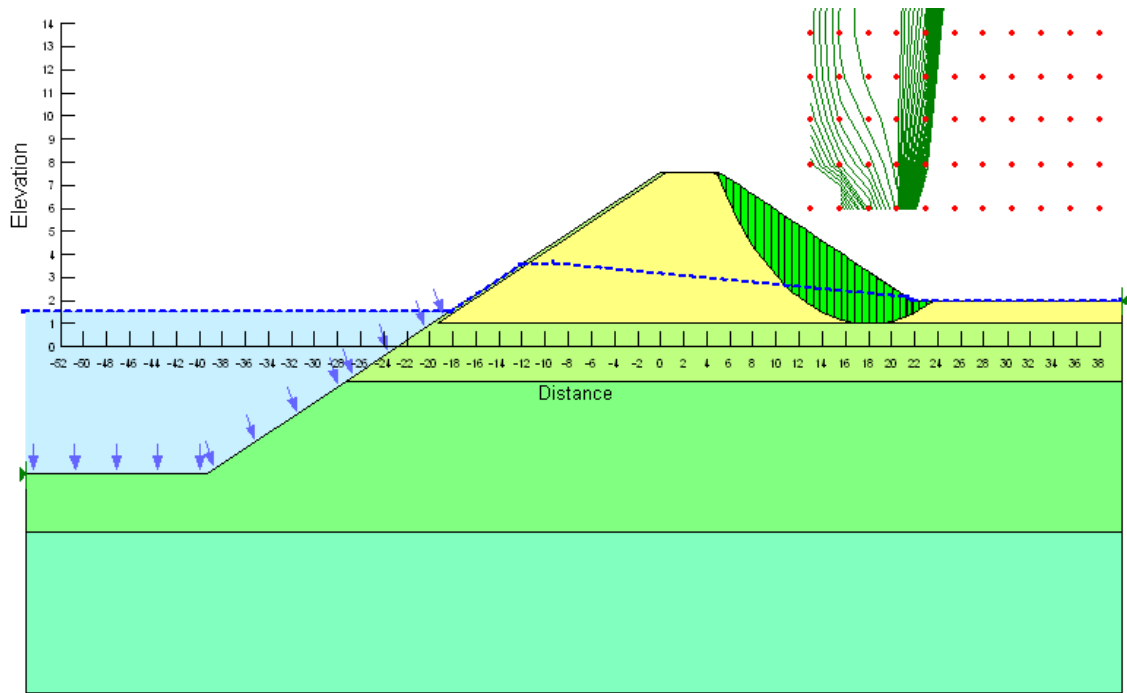




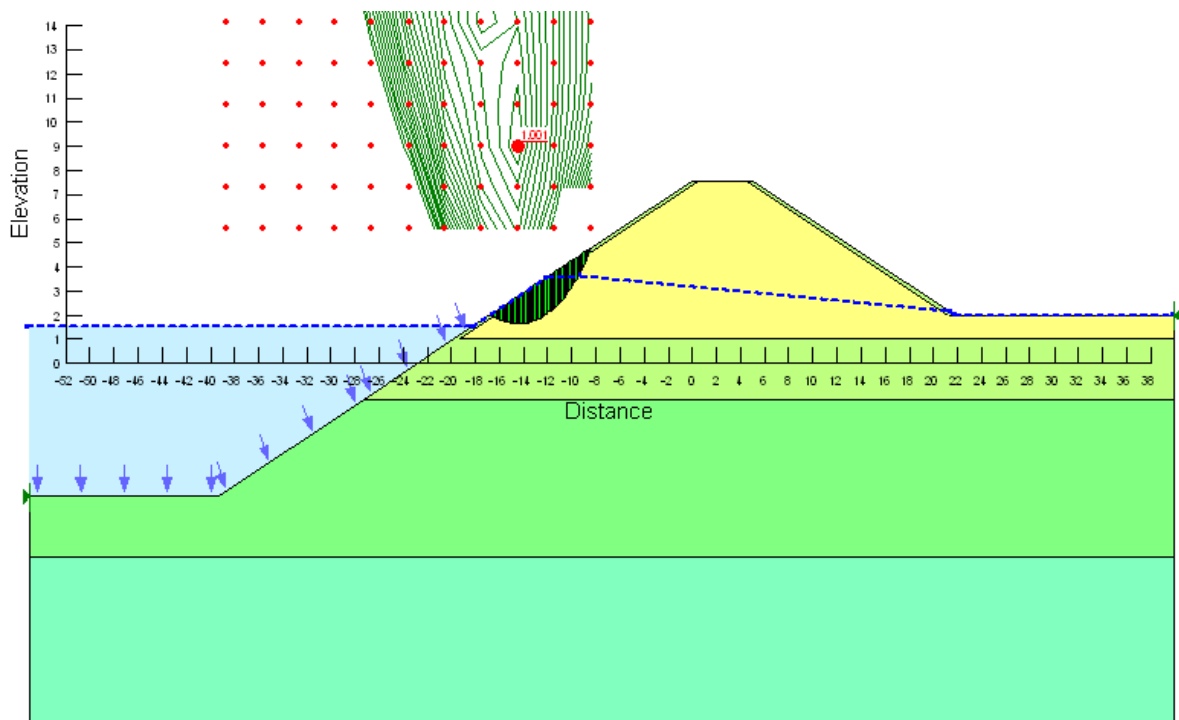
Figuur 57: Dicht gepakt zand, dikke zand laag. Landzijde.: FOS = 1.77



Figuur 58: Dicht gepakt zand, dikke zandlaag 1, rivierzijde: FOS = 1.22



Figuur 59: Weinig gepakt zand, dikke zandlaag, landzijde, FOS = 1.51



Figuur 60: Weinig gepakt zand, dikke zandlaaf rivierzijde (FOS = 1.00).

## 8. BIBLIOGRAFIE

Bundesanstalt für Wasserbau BAW (2006). *Studies on Alternative Technical-Biological Bank Protection Measures Applied on Inland Waterways*. Part 1: Motivation, Survey and International Research. BAW – BfG, Karlsruhe

DIPRO (1997). Handleiding ; Waterloopkundig Laboratorium Delft

Fauchard, C. & Mériaux, P. (2007). *Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes. Guide for implementation and interpretation*. Éditions Quae, ISBN 9782759200313.

Garman, K.M. & Purcell, S.F. (2004). *Applications for capacitively coupled resistivity surveys in Florida*. The Leading Edge, 23 (7), 697-698.

G-tec & IMDC (2010). *Evaluatie niet-destructieve methoden, in het bijzonder geofysische methoden voor onderzoek van de bresgevoeligheid van Vlaamse dijken langs de waterwegen*. Deelopdracht 1: Geofysische metingen.

IMDC (2009). *Etude des conceptions de berges dans le cadre de la liaison Seine-Escaut Est: impacts de la navigation et intégration environnementale*. I/RA/11342/09.034/NNE. Studie uitgevoerd in opdracht van SPW. Direction des Recherches hydrauliques.

IMDC ism TTE & Jan Maertens (2009). *Onderzoek naar de bresgevoeligheid van Vlaamse winterdijken. Deelopdracht 5: Opstellen van een wetenschappelijk verantwoorde en praktisch haalbare methode*. I/RA/11279/08.009/RVL. Studie uitgevoerd in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium.

IMDC ism TTE & Jan Maertens (2010). *Onderzoek naar de bresgevoeligheid van Vlaamse Winterdijken. Deelopdracht 2: Literatuuronderzoek van de grondmechanische faalmechanismen met beschrijving van de relevante faalmechanismen*. I/RA/11279/06.075/PWA. Studie uitgevoerd in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium.

Keary, Brooks & Hill (2002). *An introduction to geophysical exploration*. Blackwell Publishing.

Price & de Freitas (2009). *Engineering Geology*. Springer Verlag