

Waterbodemonderzoek met georadar (GPR)

*Mogelijkheden en randvoorwaarden voor het bepalen van
hoeveelheden baggerspecie met georadar*



2000 11

Productblad:

Toepassen van georadar in het waterbeheer

Randvoorwaarden voor het uitvoeren van waterbodemonderzoek met georadar



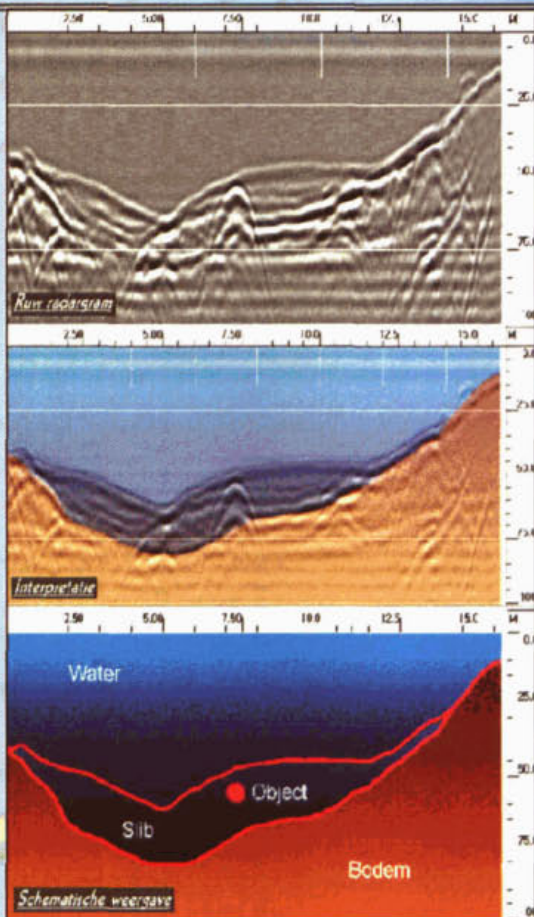
Waterbodemonderzoek met georadar.

Georadar is een geofysische onderzoekstechniek gebaseerd op het toepassen van elektromagnetische golven. Hiervoor worden antennes gebruikt die signalen met een voor de antenne karakteristieke frequentie uitzenden. Voor waterbodemonderzoek wordt meestal gebruik gemaakt van antennes die signalen met een frequentiebereik van bijvoorbeeld 100, 200, 400 of 500 MHz kunnen uitzenden. Het door een standaard radarantenne uitgezonden vermogen is vergelijkbaar met dat van een mobiele telefoon.

De uitgezonden signalen worden na reflectie op en in de waterbodem door een antenne opgevangen. Met georadar wordt de tijd tussen het uitgezonden en het opgevangen signaal gemeten. Deze tijd wordt zeer nauwkeurig vastgelegd (in nanoseconden = 10^{-9} s). Het signaal wordt pulsgewijs uitgezonden, waarbij (afhankelijk van de gebruikte apparatuur) maximaal circa 30 tot 60 metingen per seconde uitgevoerd kunnen worden. Doordat de metingen tijdens het varen kunnen worden uitgevoerd, wordt op deze wijze een bijna continu profiel van de waterbodem verkregen. De positie van de radarantenne kan door middel van een positioneringssysteem nauwkeurig worden vastgelegd.

Het opgevangen radarsignaal wordt gedigitaliseerd, en vervolgens digitaal opgeslagen. De opgeslagen radarprofielen kunnen later worden bewerkt en verwerkt met behulp van speciale software (signaalverbetering, versterken van belangrijke fenomenen in de data e.d.).

De snelheid van het radarsignaal in lucht bedraagt circa 30 cm/ns, de snelheid in water bedraagt circa 3,3 cm/ns.



Inzetbaarheid van Georadar

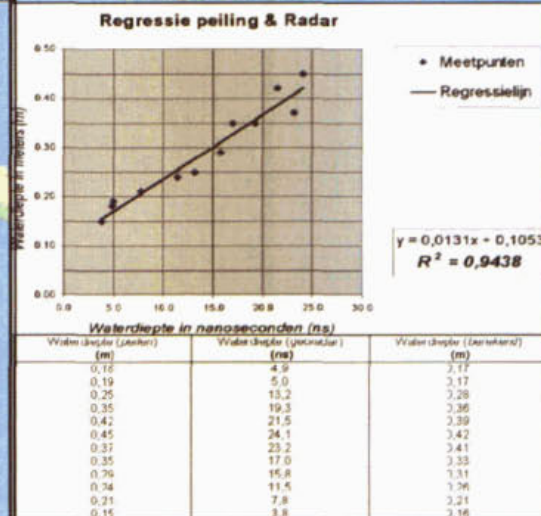
- ✓ **Meetdiepte:** vanaf 0 meter tot maximaal 3,0 meter waterdiepte.
- ✓ **Toepassen:** Alleen op zoet water.
- ✓ **Nauwkeurigheid:**
Dwarsprofielen uitgevoerd met georadar en dwarsprofielen uitgevoerd met peilstok zijn naast elkaar gelegd. Maximale afwijking is hooguit enkele centimeters (maximaal 5%). Bij bepaling van de hoeveelheid baggerspecie door verschillende radarbedrijven worden nagenoeg eenzelfde resultaat verkregen.
- ✓ **Meetdichtheid:**
Met georadar wordt (semi) continu gemeten. Door het varen van een aantal lijnen kan een steeds dichter grid worden gemeten. Dit kan vervolgens met behulp van de computer worden verwerkt tot een driedimensionaal model van de watergaten. Hieruit kunnen ondermeer dwarsprofielen worden gegenereerd.
- ✓ **Praktische inzetbaarheid:**
Alhoewel gemeten kan worden vanaf 0 meter waterdiepte is de inzet van georadar het meest effectief in bevaarbaar water. Dit houdt in dat er minimaal een vaargeul van ca. 0,5 meter diepte moet zijn. Ook kan vanaf de kant worden gemeten, maar de meetnelheid neemt dan sterk af. Voor de positionering kan het radarsysteem samen met een satellietnavigatiesysteem (DGPS) of een lasersysteem worden gekoppeld.

Bovenstaand is in 3 stappen het verloop van de interpretatie van een 'georadar'dwarsprofiel van de waterbodem weergegeven.

In het bovenste voorbeeld is een radarprofiel weergegeven zoals dit direct in het veld wordt waargenomen.

In het tweede voorbeeld zijn overgangen in de bodem geaccentueerd met kleurverschillen.

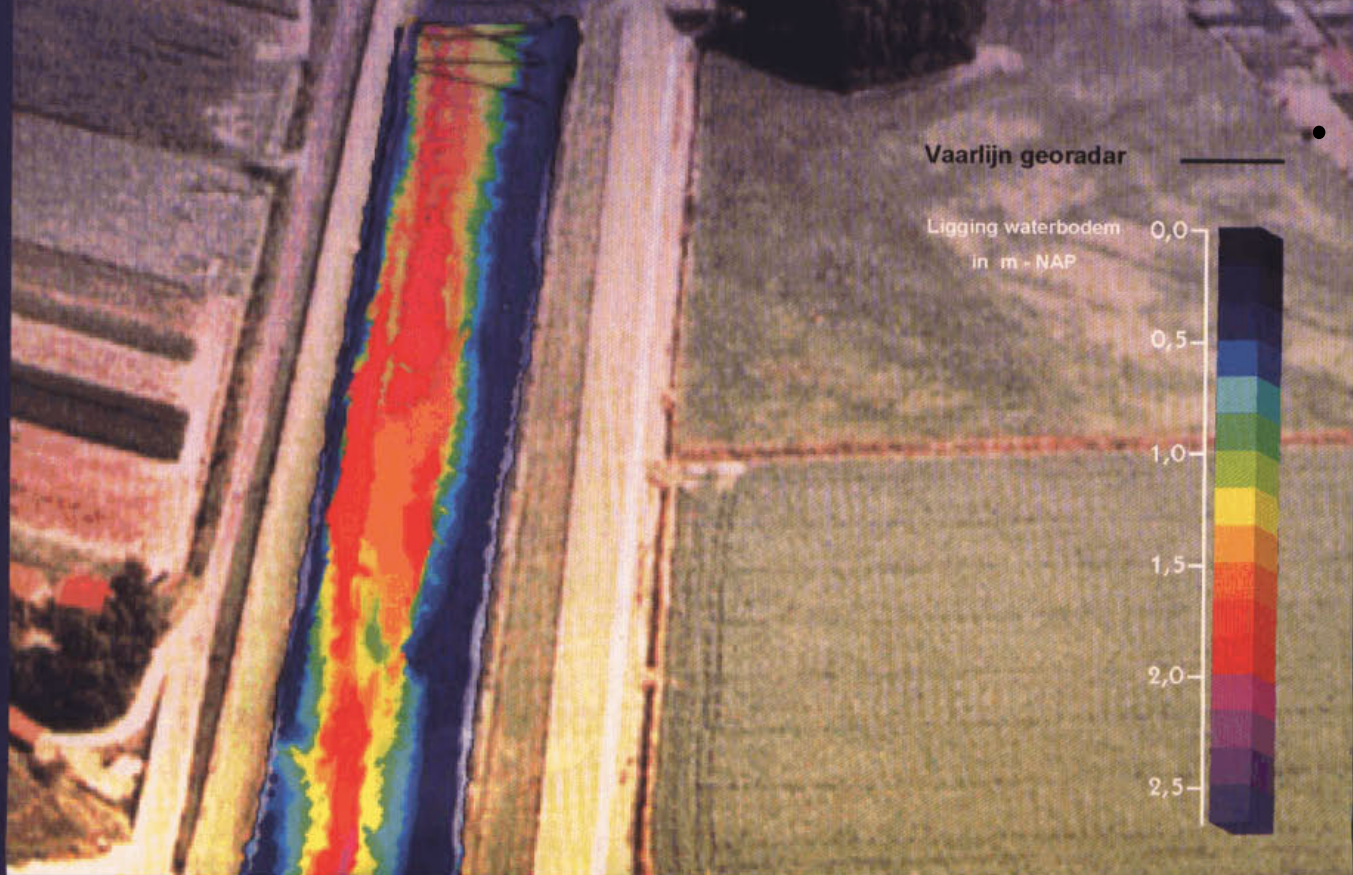
In het onderste voorbeeld is de interpretatie van het radargram geschematiseerd weergegeven.



Productblad:

Toepassen van georadar in het waterbeheer

Randvoorwaarden voor het uitvoeren van waterbodemonderzoek met georadar



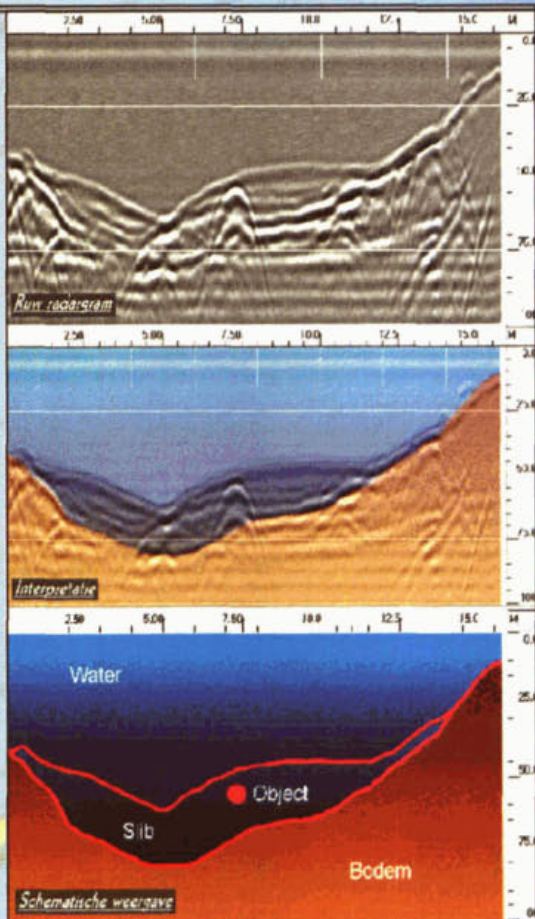
Waterbodemonderzoek met georadar.

Georadar is een geofysische onderzoekstechniek gebaseerd op het toepassen van elektromagnetische golven. Hiervoor worden antennes gebruikt die signalen met een voor de antenne karakteristieke frequentie uitzenden. Voor waterbodemonderzoek wordt meestal gebruik gemaakt van antennes die signalen met een frequentiebereik van bijvoorbeeld 100, 200, 400 of 500 MHz kunnen uitzenden. Het door een standaard radarantenne uitgezonden vermogen is vergelijkbaar met dat van een mobiele telefoon.

De uitgezonden signalen worden na reflectie op en in de waterbodem door een antenne opgevangen. Met georadar wordt de tijd tussen het uitgezonden en het opgevangen signaal gemeten. Deze tijd wordt zeer nauwkeurig vastgelegd (in nanoseconden = 10^{-9} s). Het signaal wordt pulsgewijs uitgezonden, waarbij (afhankelijk van de gebruikte apparatuur) maximaal circa 30 tot 60 metingen per seconde uitgevoerd kunnen worden. Doordat de metingen tijdens het varen kunnen worden uitgevoerd, wordt op deze wijze een bijna continu profiel van de waterbodem verkregen. De positie van de radarantenne kan door middel van een positioneringssysteem nauwkeurig worden vastgelegd.

Het opgevangen radarsignaal wordt gedigitaliseerd, en vervolgens digitaal opgeslagen. De opgeslagen radarprofielen kunnen later worden bewerkt en verwerkt met behulp van speciale software (signaalverbetering, versterken van belangrijke fenomenen in de data e.d.).

De snelheid van het radarsignaal in lucht bedraagt circa 30 cm/ns, de snelheid in water bedraagt circa 3,3 cm/ns.



Bovenstaand is in 3 stappen het verloop van de interpretatie van een 'georadar'dwarsprofiel van de waterbodem weergegeven.

In het bovenste voorbeeld is een radarprofiel weergegeven zoals dit direct in het veld wordt waargenomen.

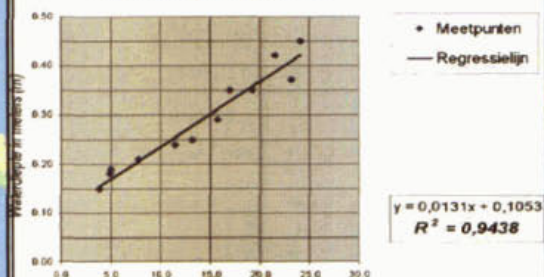
In het tweede voorbeeld zijn overgangen in de bodem geaccentueerd met kleurverschillen.

In het onderste voorbeeld is de interpretatie van het radargram geschematiseerd weergegeven.

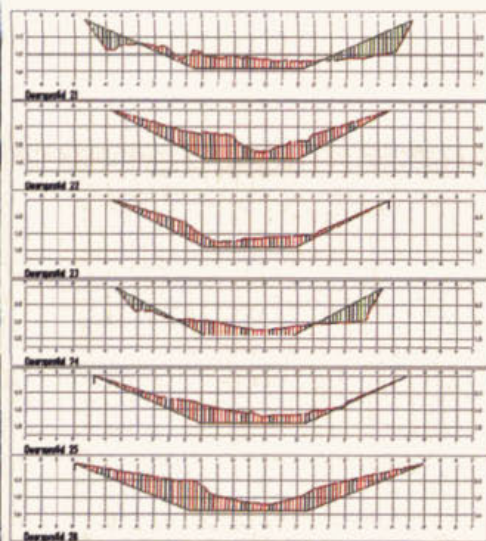
Inzetbaarheid van Georadar

- ✓ **Meetdiepte:** vanaf 0 meter tot maximaal 3,0 meter waterdiepte.
- ✓ **Toepassen:** Alleen op zoet water.
- ✓ **Nauwkeurigheid:**
Dwarsprofielen uitgevoerd met georadar en dwarsprofielen uitgevoerd met peilstok zijn naast elkaar gelegd. Maximale afwijking is hooguit enkele centimeters (maximaal 5%). Bij bepaling van de hoeveelheid baggerspecie door verschillende radarbedrijven wordt nagenoeg eenzelfde resultaat verkregen.
- ✓ **Meetdichtheid:**
Met georadar wordt (semi) continu gemeten. Door het varen van een aantal lijnen kan een steeds dichter grid worden gemeten. Dit kan vervolgens met behulp van de computer worden verwerkt tot een driedimensionaal model van de watergarage. Hieruit kunnen ondermeer dwarsprofielen worden gegenereerd.
- ✓ **Praktische inzetbaarheid:**
Alhoewel gemeten kan worden vanaf 0 meter waterdiepte is de inzet van georadar het meest effectief in bevaarbaar water. Dit houdt in dat er minimaal een vaargeul van ca. 0,5 meter diepte moet zijn. Ook kan vanaf de kant worden gemeten, maar de meetnelheid neemt dan sterk af. Voor de positionering kan het radarsysteem aan een satellitnavigatiesysteem (DGPS) of een lasersysteem worden gekoppeld.

Regressie peiling & Radar



Waterdiepte in nanoseconden (ns)		
Water diepte (peiling)	Water diepte (georadar)	Water diepte (gatsonder)
(m)	(ns)	(m)
0,10	4,9	0,17
0,19	5,0	0,17
0,25	13,2	0,28
0,35	19,3	0,36
0,42	21,5	0,39
0,45	24,1	0,42
0,37	23,2	0,41
0,25	17,0	0,33
0,36	15,8	0,31
0,24	11,5	0,26
0,21	7,8	0,21
0,15	8,8	0,16



Profiel nr.	Baggers m³	Overdiepte m³	Afsl.	Baggers m³	Overdiepte m³
21	1,56	1,58	1032	65,67	76,07
22	3,06	0,00	1046	157,86	0,00
23	1,71	0,00	1032	75,28	0,00
24	1,00	1,02	1136	44,42	45,02
25	2,04	0,01	1181	80,26	0,27
26	4,12	0,00	1225	180,86	0,00

Hydrologie:		metingsdata	
		1	04
		2	24
		3	24
		4	24
Projectnummer:		Projectnaam:	
meting opgesteld:	gvl.	formaat:	meerrijting:
1:150	jan '88	M.G.	A-3
DWARSPROFIEL NR. 21 T/W 30			
—		—	
—		—	
—		—	
—		—	

In onderstaande foto-bewerking en op de voorkant van dit productblad wordt weergegeven hoe een radaronderzoek wordt uitgevoerd. Langs willekeurig gevaren lijnen worden continu-opnames van de waterbodem verricht met de georadar. Met behulp van deze detailopnames wordt een 3-D model van het verloop van de waterbodem verkregen. Uit het 3-D model worden verschillende gegevens gehaald zoals;

hoeveelheidbepaling van baggerspecie en/of het genereren van dwarsprofielen op elke gewenste locatie (zie afbeelding links).

✓ Beperkingen bij laag aanduiding

Georadar is een instrument dat laagseparaties in beeld brengt. Des te sterker de laagseparatie, des te duidelijker de weergave van verschillende slielagen. In het geval van zeer lichte overgangen van bijvoorbeeld consolidatiefasen in slib/klei zal radar geen lagen onderscheiden.

✓ Onderzoeksgebieden georadar en waterbodem:

- ☆ Waterdiepte (bovenkant slib/waterbodem)
- ☆ Leidingdetectie (zowel op- als onder de bodem)
- ☆ Sliblaagdikte (detectie van laagovergangen)
- ☆ Waterbodemclassificatie (onderverdeling aanwezigheid puin e.d.)
- ☆ Baggerspecie hoeveelheid (hoeveelheden aan de hand van invoeren van voorkeursprofielen in het 3-D model)



Er zijn een aantal punten van het onderzoek waar de kwaliteit van het geleverde werk door de opdrachtgever kan worden gecontroleerd:

Om de radardata om te kunnen rekenen naar waterdiepten wordt tijdens het onderzoek op een aantal plaatsen ook handmatig de waterdiepte bepaald. Vervolgens wordt statistisch nagegaan wat het verband is tussen de handmatige metingen en de waterdiepten zoals die in de radardata tot uiting komen. Bij een goed radaronderzoek is het verband tussen deze twee gegevens een rechte lijn. Van een zorgvuldig uitgevoerd radaronderzoek kan een correlatie worden verwacht van $R^2 > 0,9$ voor de waterdiepte (zie grafiek links).

Een kaart waarop de ligging van de vaarlijnen is aangegeven geeft een beeld van de mate waarin het onderzoek de watergang heeft bedekt. Tevens kan dit worden aangevuld met de meetdichtheid in de vaarlijn. Hoewel hiervoor geen harde criteria bestaan kan zo een beeld worden gevormd over waar intensief is gemeten, en waar mogelijk gebieden zijn met een mindere bedekking.

Omdat met georadar data wordt verzameld op een andere manier dan men normaal gewend is, namelijk vlakdekkende (geografische) informatie inplaats van een aantal dwarsprofielen, is het mogelijk de gegevens aan te passen aan de behoeften van de beheerder (bijvoorbeeld digitaal 3-D model inpassen in GIS, onbeperkt genereren van dwarsprofielen).

MAP
Georadar Surveying

 **ARCADIS**

stowa

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

 **GEOFOX**
ADVIESBUREAU VOOR
BODEM, WATER & MILIEU

Opdrachtgever

STOWA

Postbus 8090
3503 RB Utrecht
Tel. 030 232 11 99
Fax. 030 232 17 66
Stowa@stowa.nl
www.stowa.nl

Projectcoördinatie:

Arcadis Heidemij Advies

Postbus 6058
7401 JB Deventer
Tel. 0570 690 335
Fax. 0570 627 141
www.arcadis.nl

Uitvoering:

MAP Benelux BV

Postbus 901
7301 BD Apeldoorn
Tel. 055 534 65 00
Fax. 055 534 65 07
info@mapgpr.nl
Mapgpr@wxs.nl
www.mapgpr.nl

Geofox BV

Postbus 221
7570 AE Oldenzaal
Tel. 0541 585 544
Fax. 0541 522 935
Radar@oldenzaal.geofox.nl
www.geofox.nl

begeleidingscommissie:

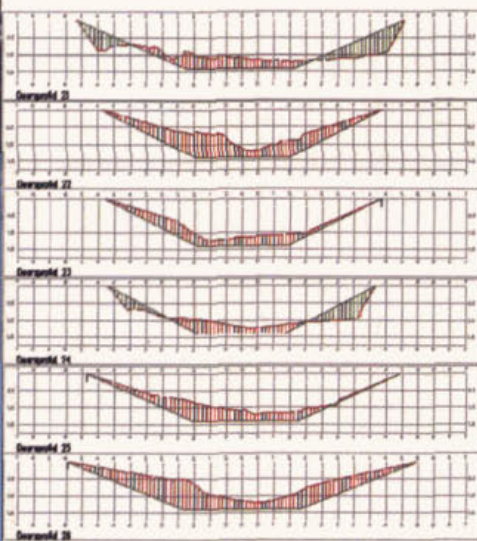
TNO-NITG

Geodelft

Polderdistrict Betuwe
Waterschap Groot Salland
Waterschap de Waterlanden

Onderzoekslocaties:

Polderdistrict Betuwe
Waterschap Regge & Dinkel
Waterschap de Waterlanden



Profiel nr.	Bagger m³	Overdiepte m³	Abst.	Bagger m³	Overdiepte m³
21	1,56	1,58	1002	65,67	76,07
22	3,08	6,08	1046	137,86	6,08
23	1,71	6,08	1002	75,26	6,08
24	1,60	1,02	1136	44,42	46,82
25	2,04	6,01	1181	88,26	6,27
26	4,12	6,06	1225	186,86	6,06

Hydrologie:		water/bodem/laag	
Projectnummers:			
subaal	opname/afname	gek.	termaat
1-100	jan '98	R.C.	A-3
DWARSPROFIEL NR. 21 T/W 30			
<ul style="list-style-type: none"> — Gevelde profiel — steen profiel Overdiepte Bagger 			

In onderstaande foto-bewerking en op de voorkant van dit productblad wordt weergegeven hoe een radaronderzoek wordt uitgevoerd. Langs willekeurig gevaren lijnen worden continu-opnames van de waterbodem verricht met de georadar. Met behulp van deze detailopnames wordt een 3-D model van het verloop van de waterbodem verkregen. Uit het 3-D model worden verschillende gegevens gehaald zoals; hoeveelheidbepaling van baggerspecie en/of het genereren van dwarsprofielen op elke gewenste locatie (zie afbeelding links).

✓ Beperkingen bij laag aanduiding

Georadar is een instrument dat laagseparaties in beeld brengt. Des te sterker de laagseparatie, des te duidelijker de weergave van verschillende slijblagen. In het geval van zeer lichte overgangen van bijvoorbeeld consolidatiefasen in slijb/klei zal radar geen lagen onderscheiden.

✓ Onderzoeksgebieden georadar en waterbodem:

- ☆ Waterdiepte (bovenkant slijb/waterbodem)
- ☆ Leidingdetectie (zowel op- als onder de bodem)
- ☆ Slijblaagdikte (detectie van laagovergangen)
- ☆ Waterbodemclassificatie (onderverdeling aanwezigheid puin e.d.)
- ☆ Baggerspecie hoeveelheid (hoeveelheden aan de hand van invoeren van voorkeursprofielen in het 3-D model)



Er zijn een aantal punten van het onderzoek waar de kwaliteit van het geleverde werk door de opdrachtgever kan worden gecontroleerd:

Om de radardata om te kunnen rekenen naar waterdiepten wordt tijdens het onderzoek op een aantal plaatsen ook handmatig de waterdiepte bepaald. Vervolgens wordt statistisch nagegaan wat het verband is tussen de handmatige metingen en de waterdiepten zoals die in de radardata tot uiting komen. Bij een goed radaronderzoek is het verband tussen deze twee gegevens een rechte lijn. Van een zorgvuldig uitgevoerd radaronderzoek kan een correlatie worden verwacht van $R^2 > 0,9$ voor de waterdiepte (zie grafiek links).

Een kaart waarop de ligging van de vaarlijnen is aangegeven geeft een beeld van de mate waarin het onderzoek de watergang heeft bedekt. Tevens kan dit worden aangevuld met de meetdichtheid in de vaarlijn. Hoewel hiervoor geen harde criteria bestaan kan zo een beeld worden gevormd over waar intensief is gemeten, en waar mogelijk gebieden zijn met een mindere bedekking.

Omdat met georadar data wordt verzameld op een andere manier dan men normaal gewend is, namelijk vlakdekkende (geografische) informatie in plaats van een aantal dwarsprofielen, is het mogelijk de gegevens aan te passen aan de behoeften van de beheerder (bijvoorbeeld digitaal 3-D model inpassen in GIS, onbeperkt genereren van dwarsprofielen).



MAP
Georadar Surveying



ARCADIS



stowa

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer



GEOFOX
ADVIESBUREAU VOOR
BODEM, WATER & MILIEU

Opdrachtgever

STOWA

Postbus 8090
3503 RB Utrecht
Tel. 030 232 11 99
Fax. 030 232 17 66
Stowa@stowa.nl
www.stowa.nl

Projectcoördinatie:

Arcadis Heidemij Advies

Postbus 6058
7401 JB Deventer
Tel. 0570 690 335
Fax. 0570 627 141
www.arcadis.nl

Uitvoering:

MAP Benelux BV

Postbus 901
7301 BD Apeldoorn
Tel. 055 534 65 00
Fax. 055 534 65 07
info@mapgpr.nl
Mapgpr@wxs.nl
www.mapgpr.nl

Geofox BV

Postbus 221
7570 AE Oldenzaal
Tel. 0541 585 544
Fax. 0541 522 935
Radar@oldenzaal.geofox.nl
www.geofox.nl

begeleidingscommissie:

TNO-NITG

Geodelft

Polderdistrict Betuwe
Waterschap Groot Salland
Waterschap de Waterlanden

Onderzoekslocaties:

Polderdistrict Betuwe
Waterschap Regge & Dinkel
Waterschap de Waterlanden

Waterbodemonderzoek met georadar (GPR)

*Mogelijkheden en randvoorwaarden voor het bepalen van
hoeveelheden baggerspecie met georadar*

2000

11

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66
E-mail stowa@stowa.nl
<http://www.stowa.nl>

Publicaties en het publicatie-
overzicht van de STOWA kunt u
uitsluitend bestellen bij:
Hageman Fulfilment
Postbus 1110
3330 CC Zwijndrecht
tel. 078 - 629 33 32
fax 078 - 610 42 87
e-mail: hff@wxs.nl
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.
ISBN 90.5773.091.x

INHOUDSOPGAVE

Ten Geleide	1
Samenvatting	2
1. Inleiding	4
2. Probleemstelling	5
3. Onderzoeksopzet	7
4. Georadar theorie	8
5. Beschrijving praktijk radarmetingen	11
5.1 Algemeen	11
5.2 Randvoorwaarden bij waterbodemonderzoek met georadar	11
5.3 Positionering bij waterbodemonderzoek	12
5.4 Meetdichtheid	12
5.5 Welke sliblaagdikten kunnen met radar worden waargenomen ?	13
6. Waterbodemtoepassingen	14
6.1 Vaststellen bovenkant waterbodem	14
6.2 Vaststellen onderkant sliblaag	15
6.3 Bepalen totale hoeveelheid slib en/of baggerspecie	16
6.4 Waterbodemclassificatie	17
6.5 Detectie kabels, leidingen en objecten	18
7. Vergelijking met andere beschikbare onderzoekstechnieken	19
8. Georadar praktijk	21
8.1 Inleiding	21
8.2 Onderzoek Weezebeek te Almelo (zandondergrond)	21
8.3 Onderzoek Maurikse Wetering te Maurik (kleiondergrond)	23
8.4 Onderzoek Zije nabij Edam, (veenondergrond, bedrijf A)	24
8.5 Onderzoek Zije nabij Edam (veenondergrond, bedrijf B)	26
9. Evaluatie en conclusies	29
10. Kosten - baten analyse waterbodemonderzoek met georadar	31
11. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	33
12. Verklarende Woordenlijst	34

BIJLAGEN

- 1 Waterbodemonderzoek Weezebeek te Almelo**
 - 1A Ligging onderzochte locatie
 - 1B Ligging meetlijnen
 - 1C Ligging waterbodem
 - 1D Diepteijking radarmetingen Weezebeek Almelo
 - 1E Een dwarsprofiel door de Weezebeek

- 2 Waterbodemonderzoek Mauriksewetering te Maurik**
 - 2A Ligging onderzochte lokatie
 - 2B Overzicht vaarlijnen en profielen
 - 2C Detailopname dieptemeting
 - 2D Afijking waterdiepte
 - 2E Overzicht profielen radar en conventioneel
 - 2F Overzicht boorprofielen
 - 2G Overzicht ijkingsradargrammen
 - 2H Afijking slibdiktemeting

- 3 Waterbodemonderzoek Zije nabij Edam (bedrijf A)**
 - 3A Ligging onderzochte lokatie
 - 3B Overzicht vaarlijnen en profielen
 - 3C Overzicht dieptemetingen
 - 3D Afijking waterdiepte
 - 3E Overzicht boorprofielen

- 4 Waterbodemonderzoek Zije nabij Edam (bedrijf B)**
 - 4A Ligging meetlijnen
 - 4B Diepteijking radarmetingen de Zije, polder Zeevang
 - 4C Ligging waterbodem
 - 4D Dikte te baggeren laag

Ten Geleide

Het baggeren van watergangen behoort tot de belangrijkste taken van waterbeheerders. De aanleiding tot het uitvoeren van baggerwerken is verschillend, evenals de wijze waarop het baggerwerk wordt uitgevoerd. Wat echter meestal gelijk is, is dat voorafgaand aan het baggeren onderzoek wordt uitgevoerd naar de hoeveelheid en de kwaliteit van de te verwijderen specie. In veel gevallen wordt de hoeveelheid baggerspecie bepaald door diktemetingen met een prikstok te vertalen naar profielen en vervolgens naar volumes per lengte-eenheid. Deze methode is arbeidintensief en omslachtig.

De STOWA heeft daarom opdracht gegeven om te onderzoeken of georadar is te gebruiken bij het bepalen van de hoeveelheid baggerhoeveelheden en of deze methode de mogelijkheid biedt de (fysische) samenstelling van de waterbodem en de ondergrond op een eenvoudige wijze in beeld te brengen.

Het onderzoek is onder externe coördinatie uitgevoerd door een consortium van twee Nederlandse bedrijven met ervaring op het gebied van het waterbodemonderzoek met georadar. Het onderzoek is uitgevoerd door:

- Arcadis Projectcoördinatie
- MAP Benelux B.V. Opstellen kennisdocument, uitvoeren radaronderzoek
- Geofox B.V. Opstellen kennisdocument, uitvoeren radaronderzoek

Het onderzoek is begeleid door een commissie waarin een aantal kennisinstituten en waterbeheerders vertegenwoordigd waren. De samenstelling van de commissie was als volgt:

- ARCADIS Heidemij Advies Ir. L.N.J.M. van der Drift
- Geo Delft Dr. J.K. van Deen
- NITG-TNO Dr. J.A.C. Meekes
- Polderdistrict Betuwe Ing. H.C.A. Nonnekens en ing R.J.Bos
- Waterschap Groot-Salland Ing. G. Groenewold
- Waterschap De Waterlanden Ing. H. Verhoeve
- STOWA Drs. B. van der Wal

Het Polderdistrict Betuwe, Waterschap De Waterlanden en Waterschap Regge en Dinkel hebben onderzoekslocaties en meetgegevens ter beschikking gesteld zodat een aantal praktijkgevallen in gebieden met een verschillende bodemopbouw (zand/klei/veen) in het onderzoek kon worden betrokken.

Het onderzoek heeft een positief beeld opgeleverd van de mogelijkheden voor de toepassing van georadar in het waterbeheer.

Utrecht, februari 2000

De directeur van de STOWA,

Ir. J.M.J. Leenen

Samenvatting

In opdracht van de STOWA heeft een onderzoek plaatsgevonden om de mogelijkheden en beperkingen van georadar voor waterbodemonderzoek te onderzoeken.

De aanleiding voor het onderzoek is het gebrek aan kennis van, en ervaring met de georadartechniek bij de waterbeheerders. Gezien de potentie van deze meetmethode voor waterbodemonderzoek in ondiepe binnenwateren achtte de STOWA het zinvol om een kennisdocument voor deze toepassing op te laten stellen.

Het doel van het onderzoek is om de waterbeheerder een goed beeld te geven van de mogelijkheden, nauwkeurigheid en beperkingen van georadar voor waterbodemonderzoek in de Nederlandse binnenwateren.

Het onderzoek heeft bestaan uit een theoretisch en een praktijkgedeelte, waarbij:

- Het voorliggende kennisdocument over de mogelijkheden van radartoepassing is opgesteld;
- De toepasbaarheid van de methodiek voor verschillende typen watergangen is onderzocht middels een viertal praktijkonderzoeken.

De mogelijkheden om georadar in te zetten bij waterbodemonderzoek zijn :

- Vaststellen waterdiepte (bovenkant slib/waterbodem);
- Bepalen hoeveelheid baggerspecie (wordt berekend aan de hand van waterdiepte en een voorkeurprofiel/voorkeursdiepte van de watergang);
- Vaststellen slibdikte (door directe detectie boven- en onderkant slib);
- Waterbodemclassificatie (bijvoorbeeld uitkarteren gebieden met puinbestorting, of gebieden met/zonder slib);
- Detecteren van kabels, leidingen en objecten op/onder de waterbodem.

De eerstgenoemde drie toepassingsmogelijkheden zijn in een viertal praktijksituaties door twee radarbedrijven onafhankelijk van elkaar onderzocht. De resultaten van het onderzoek voor deze drie gebieden zijn als volgt :

Algemeen

Algemeen kan gesteld worden dat het uitgevoerde onderzoek heeft aangetoond dat georadar een geschikt instrument is om de waterdiepte en de hoeveelheid in-situ baggerspecie van ondiepe zoete watergangen (waterdiepte minimaal circa 0,3 tot maximaal circa 2,5 à 3,5 m) in kaart te brengen. De methode is niet geschikt voor zout of brak water.

Bepalen waterdiepte met georadar

Bij een vergelijking van radarmetingen met middels conventioneel onderzoek bepaalde waterdiepten voor een viertal onderzochte werden correlaties bepaald die tussen $R^2 = 0,94$ en $0,99$ lagen. Metingen die door twee bedrijven onafhankelijk van elkaar op eenzelfde locatie zijn uitgevoerd leverden resultaten die sterk overeenkomen.

De meetmethode levert goede resultaten voor alle onderzochte bodemtypen (klei, veen, zand).

Een voorgenomen vergelijking van de resultaten van een radarpeiling met de resultaten van een door een waterschap uit te voeren akoestische peiling kon niet worden gerealiseerd, omdat de akoestische metingen niet zijn uitgevoerd.

Bepalen baggerspeciehoeveelheid met georadar

De hoeveelheid in-situ baggerspecie wordt bepaald als het volume dat tussen de actuele waterbodem en het voorkeurprofiel van de watergang aanwezig is.

In het project is door twee radarbedrijven onafhankelijk van elkaar de hoeveelheid baggerspecie van eenzelfde onderzoekstraject bepaald. Om de gegevens goed te kunnen vergelijken hebben beide bedrijven in hun berekening gebruik gemaakt van dezelfde oeverlijnen en hetzelfde voorkeurprofiel. De resultaten van deze geautomatiseerde berekeningen zijn aangegeven in onderstaande tabel

Resultaten baggerspecie berekeningen

	Bedrijf A	Bedrijf B
In-situ volume te verwijderen baggerspecie	4.932 m³	4.810 m³

Aangezien de resultaten van de twee onafhankelijke onderzoeken goed overeenkomen betekent dit dat de reproduceerbaarheid van de meetmethode goed is.

Bepalen slibdikte met georadar

Voor het bepalen van de sliblaagdikte is het noodzakelijk dat zowel de bovenkant als ook de onderkant van de sliblaag in de radardata eenduidig tot uiting komen.

De voorwaarden waaraan een onderzoekslocatie moet voldoen om de sliblaagdikte direct uit georadarmetingen te kunnen bepalen zijn momenteel niet goed bekend. Bij de vier uitgevoerde onderzoeken is de directe detectie van de sliblaag in één geval mogelijk geweest (kleigebied). In de andere drie gevallen kon de onderkant van de sliblaag niet worden waargenomen (veengebied), of was er geen sprake van een goed gedefinieerde sliblaag (zandgebied).

Eerdere ervaringen van de deelnemende radarbedrijven gaven aan dat de directe detectie van een sliblaag voornamelijk bij gebieden met een zandondergrond mogelijk zou zijn.

Bij een vergelijking van uit radarmetingen bepaalde slibdikten met middels conventioneel onderzoek bepaalde slibdikten werden voor de klei-locatie correlaties van $R^2 = 0,84$ tot $0,94$ bepaald.

1. Inleiding

Bij de waterbeheerders ontstaat de laatste jaren een steeds beter inzicht in de kosten van het conventioneel peilen van watergangen en het bepalen van de baggerspeciehoeveelheden. Gezien de hoge kosten wordt naar goedkopere en/of nauwkeurigere meetmethoden gezocht. Uit de reeds opgedane ervaringen van waterschappen met georadar blijkt dat radar een bruikbaar en kosteneffectief hulpmiddel kan zijn om waterdiepten en baggerspeciehoeveelheden te bepalen. De randvoorwaarden waarbinnen een radaronderzoek met goed resultaat kan worden uitgevoerd zijn echter veelal niet bij de eindgebruiker bekend. Zodoende is in opdracht van de STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer) een onderzoek verricht om de mogelijkheden en beperkingen van georadar voor waterbodemonderzoek te onderzoeken.

De aanleiding voor het onderzoek is het gebrek aan kennis van, en ervaring met de georadartechniek bij de waterbeheerders. Gezien de potentie van deze meetmethode voor waterbodemonderzoek in ondiepe binnenwateren achtte de STOWA het zinvol om een kennisdocument voor deze toepassing op te laten stellen.

Dit kennisdocument is opgesteld voor de regionale waterbeheerder met als beheersgebied de zoete binnenwateren. Het is toegespitst op de in Nederland veel voorkomende watergangen met een waterdiepte van maximaal 2,5 à 3 meter.

Het doel van het onderzoek is om de regionale waterbeheerder een goed beeld te geven van de mogelijkheden, nauwkeurigheid en beperkingen van georadar voor waterbodemonderzoek in relatie tot andere alternatieve technieken voor waterbodemonderzoek in de Nederlandse binnenwateren.

De opbouw van het rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de probleemstelling. De onderzoeksopzet wordt besproken in hoofdstuk 3. De theorie van georadarmetingen wordt in hoofdstuk 4 kort beschreven, terwijl in hoofdstuk 5 de praktijk van de metingen wordt beschouwd.

De verschillende toepassingen van georadar voor waterbodemonderzoek worden behandeld in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 wordt de georadartechniek vergeleken met andere beschikbare meetmethoden voor waterbodemonderzoek.

De voor het onderhavige onderzoek uitgevoerde praktijkmetingen staan beschreven in hoofdstuk 8. In hoofdstuk 9 zijn de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek verwoord. In hoofdstuk 10 is een kosten-baten analyse van de radarmethode voor waterbodemonderzoek uitgewerkt. De aanbevelingen voor vervolgonderzoek staan beschreven in hoofdstuk 11.

2. Probleemstelling

Dit kennisdocument is opgesteld voor de regionale waterbeheerder met als beheersgebied de zoete binnenwateren. Het is toegespitst op de in Nederland veel voorkomende watergangen met een waterdiepte van maximaal 2,5 à 3 meter.

De regionale waterbeheerders hebben de taak watergangen te baggeren ten behoeve van de waterhuishouding en waterkwaliteit. Om deze reden is het voor de beheerder van belang om een goed beeld te krijgen van de problematiek in zijn beheersgebied.

In de sedimentrijke, traagstromende watergangen in Nederland wordt continu fijn materiaal op de bodem afgezet. Door dit proces worden de watergangen ondieper. Dit vermindert de afvoer van een watersysteem, is nadelig voor de waterkwaliteit en kan hinder voor scheepvaart opleveren.

Van oudsher is de baggerspecie nuttig gebruikt, bijvoorbeeld voor het ophogen van grondstukken of als bodemverbeteraar in de landbouw. Verontreinigd slib moet daarentegen gezien moet worden als een afvalstof, waarbij de kosten voor verwerking, reiniging of het storten aanzienlijk kunnen zijn.

Hierdoor groeit de vraag naar nauwkeurige meetmethoden voor het bepalen van slib- en baggerspeciehoeveelheden. Deze vraag wordt mede ingegeven doordat de traditionele methode (peilstokmetingen) zeer arbeidsintensief en kostbaar is.

Bij peilstokmetingen (ook prikstokmetingen genoemd) wordt een stok met schaalverdeling in het water gestoken, en wordt de diepte van de waterbodem en de vaste waterbodem op het gevoel bepaald.

Uit een enquête die in de voorbereidende fase van dit onderzoek onder probleembezitters en adviesbureaus is gehouden blijkt dat er, naast prikstokmetingen en multisamplermetingen (een soort steekbus) voornamelijk twee meetmethoden gebruikt worden:

- Akoestische technieken (metingen met hoogfrequente geluidsgolven);
- Georadartechniek (metingen met hoogfrequente elektromagnetische golven).

Incidenteel wordt een aantal alternatieve technieken ingezet.

De mogelijkheden en beperkingen van akoestische technieken voor waterbodemonderzoek zijn reeds in een aantal algemeen beschikbare kennisdocumenten beschreven (bijvoorbeeld CUR rapport 97-4, Geofysische technieken te water, 1997).

Omdat waterbodemonderzoek met behulp van georadar een relatief nieuwe ontwikkeling is, blijkt deze techniek tot nu toe nog niet beschreven te zijn in een kennisdocument.

De georadar meetmethode kent ten opzichte van de akoestische technieken een eigen inzetbereik met eigen mogelijkheden en beperkingen.

Akoestische technieken zijn goed inzetbaar in dieper water (vanaf circa 1 meter tot kilometers diep), maar kennen veelal problemen bij toepassing in ondiep water (decimeters tot enkele meters), waar zich juist een groot gedeelte van de slibproblematiek afspeelt.

Daarom is tot nu toe voor deze ondiepe watergangen voornamelijk gebruik gemaakt van prikstokmetingen, waarmee de bovenkant van het slib en de vaste waterbodem subjectief en discontinu in kaart wordt gebracht.

Om een beter inzicht in het profielverloop, aanwas en opbouw van de waterbodem ten behoeve van de hoeveelheidsbepaling van baggerspecie te krijgen, worden alternatieve methoden aangedragen om de waterbodem in kaart te brengen waaronder georadar. Georadar is een techniek, die de nodige specialistische kennis en ervaring vereist. Daarnaast is vooraf niet altijd duidelijk voor de waterbeheerder welke resultaten hij mag verwachten van de inzet van georadar. Om dit gebrek aan kennis te verminderen is dit kennisdocument opgesteld, dat zich met name richt op de problematiek van de waterbeheerders.

3. Onderzoeksopzet

Bij het opstellen van het onderzoeksprogramma is nagegaan wat de beste manier is om kennis van de radartechniek aan de waterbeheerders te kunnen overdragen.

De mogelijkheden om georadar in te zetten bij waterbodemonderzoek zijn :

- Vaststellen waterdiepte (bovenkant slib/waterbodem);
- Bepalen hoeveelheid baggerspecie (wordt berekend aan de hand van waterdiepte en een voorkeurprofiel/voorkeursdiepte van de watergang);
- Vaststellen slibdikte (door directe detectie boven- en onderkant slib);
- Waterbodemclassificatie (bijvoorbeeld uitkarteren gebieden met puinbestorting, of gebieden met/zonder slib);
- Detecteren van kabels, leidingen en objecten op/onder de waterbodem.

Er is gekozen voor een gecombineerde aanpak, waarin:

- Een kennisdocument over de mogelijkheden van radartoepassing wordt opgesteld;
- De toepasbaarheid van de methodiek voor verschillende typen watergangen wordt onderzocht.

Aangezien de voornaamste bodemtypen in Nederland bestaan uit zand, klei en veen is ervoor gekozen om in ieder van bovengenoemde drie gebieden een waterbodemonderzoek over een beperkt gebied (1 tot 2,5 km) uit te voeren. Een van de drie gebieden wordt door beide bedrijven doorgemeten, zodat vergelijking van de resultaten mogelijk is.

De onderzoeksgebieden betreffen:

- Zandbodem : de Weezebeek in Almelo;
- Kleibodem : Mauriksewetering te Maurik;
- Klei/veenbodem : de Zije in polder Zeevang (bij Edam).

Het onderzoeksgebied nabij Edam is door beide bedrijven doorgemeten. Hiervoor is gekozen omdat de beheerder van deze watergang aan het begin van het jaar van plan was om de watergang door middel van akoestische technieken uit te karteren. Hierdoor zouden niet alleen de reproduceerbaarheid van radarmetingen vergeleken kunnen worden, maar zou ook een vergelijking gemaakt kunnen worden met de resultaten van een andere meettechniek.

De afzonderlijke locaties zijn vanaf het wateroppervlak ingemeten met behulp van georadar, volgens een random-survey meetprincipe. Dit houdt in dat de watergang niet wordt ingemeten volgens een vaststaand raster van meetlijnen, maar door middel van semi-willekeurige meetlijnen. Tijdens het varen worden enkele tientallen metingen per seconde uitgevoerd, waardoor de diepte wordt vastgelegd. Met behulp van een positioneringssysteem wordt tijdens het meten tevens de positie bepaald. Voor iedere meetlocatie is aan de hand van prikstokmetingen en multisamplermetingen een kalibratie van de radarmetgegevens uitgevoerd. Hiermee zijn de uit de radardata afgeleide meetwaarden omgerekend naar waterdiepten en slibdikten.

Van de locaties wordt de waterdiepte gekarteerd en als contourkaart aangeleverd. Daarnaast zal worden nagegaan of de sliblaagdikte of de baggerspeciehoeveelheid uit de radardata kan worden bepaald.

Het kennisdocument is in samenwerking met de coördinator van het project door beide radarbedrijven gezamenlijk opgesteld.

4. Georadar theorie

Georadar is een niet-destructieve geofysische onderzoekstechniek die met name geschikt is voor onderzoek van de ondiepe ondergrond vanaf enkele centimeters tot een diepte van enkele meters. Onder optimale omstandigheden zijn enkele tientallen meters onder maaiveld mogelijk. Deze onderzoeksmethode wordt internationaal al enkele decennia gebruikt om de ondergrond tot enkele meters diepte in kaart te brengen.

Metingen op (ondiep) binnenwater zijn voor Nederland echter een relatief nieuw toepassingsgebied waar de georadartechniek goed inzetbaar blijkt. Andere geofysische meettechnieken komen daar in het algemeen minder tot hun recht komen.

Het principe van de georadar is gebaseerd op toepassing van elektromagnetische golven. Hiervoor worden antennes gebruikt die signalen met een voor de antenne karakteristieke frequentie uitzenden. Voor waterbodemonderzoek wordt meestal gebruik gemaakt van verschillende antennes die signalen met een frequentiebereik van bijvoorbeeld 100, 200, 400 of 500 MHz kunnen uitzenden. Deze frequenties liggen in dezelfde orde van grootte als of mobiele telefoonnetten: deze werken veelal met frequenties tussen de 100 en 900 MHz. Het door een standaard radarantenne uitgezonden vermogen is vergelijkbaar met dat van een mobiele telefoon.

De uitgezonden signalen worden na reflectie op en in de waterbodem door een antenne opgevangen. Met georadar wordt de tijd tussen het uitgezonden en het opgevangen signaal gemeten. Deze tijd wordt zeer nauwkeurig vastgelegd (in nanoseconden = 10^{-9} s). Het signaal wordt pulsgewijs uitgezonden, waarbij (afhankelijk van de gebruikte apparatuur) maximaal circa 30 tot 60 metingen per seconde uitgevoerd kunnen worden. Doordat de metingen tijdens het varen kunnen worden uitgevoerd, wordt op deze wijze een bijna continu profiel van de waterbodem verkregen. De positie van de radarantenne kan door middel van een positioneringssysteem nauwkeurig worden vastgelegd.

Het opgevangen radarsignaal wordt gedigitaliseerd, en vervolgens digitaal opgeslagen. De opgeslagen radarprofielen kunnen later worden bewerkt en verwerkt met behulp van speciale software (signaalverbetering, versterken van belangrijke fenomenen in de data e.d.).

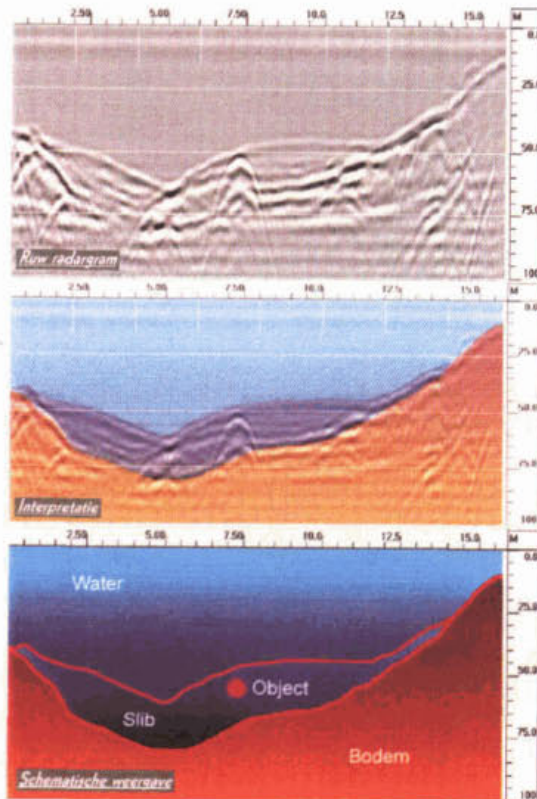
De snelheid van het radarsignaal in lucht bedraagt circa 30 cm/ns, de snelheid in water bedraagt circa 3,3 cm/ns.

Doordat het signaal met toenemende diepte uitdempt zijn metingen vanaf het wateroppervlak in Nederlandse omstandigheden slechts mogelijk tot een waterdiepte tot maximaal circa 3-5 m. De mate van demping hangt sterk af van de elektrische geleiding van het water: Hoe geleidender het water, hoe sneller het radarsignaal uitdempt. In zeewater bedraagt de penetratie enkele mm tot enkele cm. De toepassingen beperken zich dan ook tot zoet water.

De golflengte van een 400 MHz radarsignaal bedraagt in lucht circa 75 cm, in water circa 8 cm. Om een zo hoog mogelijke resolutie te bereiken moet met een zo hoog mogelijke antennefrequentie worden gemeten. Een hogere frequentie dempt echter sneller uit dan een lage. Dit betekent dat per project dient te worden nagegaan wat de optimale frequentie is.

Voor diepere zoete watergangen bestaat de mogelijkheid om de radarantenne onder water te brengen. Deze toepassing is voornamelijk van belang is voor rivieren en kanalen, en is als zodanig voor de doelgroep van dit onderzoek minder interessant. Deze toepassing wordt dan ook alleen voor de volledigheid vermeld.

Een voorbeeld van een radarprofiel van een waterbodem en hoe deze wordt geïnterpreteerd is te zien in figuur 4.1. Hierin is verticaal de looptijd en de diepte van het signaal uitgezet in nanoseconden, en horizontaal de afstand in meters. De kleuren en grijswaarden geven de sterkte van het gereflecteerde radarsignaal weer.



Figuur 4.1: Voorbeeld radardata en interpretatie

De geregistreerde reflecties geven aan waar materiaalovergangen in de ondergrond aanwezig zijn. Een geoefende waarnemer kan in een goed radarprofiel vaak verschillende lagen herkennen. Voor het benoemen van de verschillende lagen moeten er referentie gegevens beschikbaar zijn.

Radargolven reageren op andere fysische parameters dan bijvoorbeeld geluidsgolven. Een geluidsgolf wordt gereflecteerd op een overgang in dichtheid, een radargolf reflecteert op een overgang in diëlektrische constante. Hoewel de achterliggende fysische mechanismen sterk verschillen is de werking van de methoden vergelijkbaar.

De verticale schaal van de radarmetingen is een tijdschaal, en geen diepteschaal. Om de radarprofielen om te kunnen rekenen naar diepteprofielen moet de snelheid van de elektromagnetische golven in de verschillende media bekend zijn. Deze omrekening vindt veelal plaats aan de hand van een vergelijking met een aantal handmetingen in de te onderzoeken watergang (prikstokmetingen, metingen met multisampler e.d.).

Het uitvoeren van radarmetingen en de verwerking van de gegevens is specialistisch werk. Dit betekent dat het voor een opdrachtgever moeilijk na te gaan is of het werk goed is uitgevoerd. Er zijn echter een aantal punten van het onderzoek waar de kwaliteit van het geleverde werk door de opdrachtgever kan worden gecontroleerd:

- Bij een onderzoek naar waterdiepte/slibdikte dient altijd een correlatiegrafiek overlegd te worden waaruit blijkt hoe de radarmetingen worden omgerekend naar waterdiepten en/of slibdikten. Indien de radarmetingen geen goede correlatie vertonen met op een andere wijze gemeten waterdiepten/slibdikten kan geen goed resultaat worden verwacht. Van een zorgvuldig uitgevoerd radaronderzoek kan een correlatie van meer dan $R^2 = 0,8$ à $0,9$ worden verwacht;
- Een kaart waarop de ligging van de vaarlijnen is aangegeven geeft een beeld van de mate waarin het onderzoek de watergang heeft bedekt. Hoewel hiervoor geen harde criteria bestaan kan zo een beeld worden gevormd over waar intensief is gemeten, en waar mogelijk gebieden zijn met een mindere bedekking;
- De opdrachtgever kan vragen om in de rapportage aan te geven hoeveel datapunten er totaal, per strekkende meter profiellijn of per vierkante meter watergang gerealiseerd zijn bij het onderzoek. Hoewel ook hier geen vaste waarden genoemd kunnen worden geven deze getallen de opdrachtgever een beeld van de onderzoeksinspanning en van de hoeveelheid informatie die ten grondslag ligt aan het geleverde meetresultaat.

Het zal duidelijk zijn dat niet de hoeveelheid data, maar de verdeling van de meetpunten over het onderzoeksgebied de uiteindelijke kwaliteit van de metingen zal bepalen. Zo zal bijvoorbeeld het uitvoeren van vele honderden metingen per meter profiellijn, terwijl de profiellijnen zelf op een grote onderlinge afstand liggen wel tot een groot aantal meetpunten per oppervlakte-eenheid leiden, maar niet tot een betrouwbaar beeld van de waterbodem.

5. Beschrijving praktijk radarmetingen

5.1 Algemeen

De inzetbaarheid van georadar ten behoeve van waterbodemonderzoek is voor Nederlandse omstandigheden reeds bewezen in verscheidene waterbodemonderzoekprojecten die door verschillende bedrijven zijn uitgevoerd. De onderzoekseisen lopen uiteen van het uitkarteren van puinlagen en sliblagen, het lokaliseren van objecten tot het uitvoeren van peilmetingen. De georadar is tijdens deze projecten voornamelijk ingezet vanaf het wateroppervlak. Daarnaast zijn er ook enkele proefprojecten uitgevoerd waarbij de antenne onder water is gebracht. Doordat de antenne nu dichterbij de waterbodem gebracht kan worden, kan ook in dieper water gemeten worden.

Gezien de behoeften van de onderhavige doelgroep wordt alleen ingegaan op radarmetingen vanaf het wateroppervlak.

De techniek voor het verrichten van waterbodemonderzoek met radar is door de beide uitvoerende bedrijven simultaan, en in concurrentie, ontwikkeld. Dit betekent dat er verschillende oplossingen zijn voor de logistiek, de veldprocedure, de positionering, de dataverwerking en de presentatie van de resultaten. Ondanks verschillen in detailuitwerking komen de gebruikte werkwijzen sterk overeen. Het is daarom mogelijk om algemene uitspraken te doen over de techniek, waarin algemeen geldende randvoorwaarden, mogelijkheden en beperkingen kunnen worden beschreven. In de volgende paragrafen wordt kort hierop ingegaan.

5.2 Randvoorwaarden bij waterbodemonderzoek met georadar

Waterbodemonderzoek met georadar kent enkele beperkingen, zo bedraagt de penetratie van georadar in zout water maximaal enkele centimeters. Dit wordt veroorzaakt door de hoge elektrische geleidbaarheid van het water, waardoor het radarsignaal zeer sterk wordt gedempt. Zodoende kan niet in een zoute omgeving worden gemeten.

Daarnaast wordt de kwaliteit van de radardata vaak negatief worden beïnvloed door aanwezigheid van metalen objecten boven het wateroppervlak. Om een zo optimaal mogelijk resultaat te behalen, wordt daarom veelal gekozen voor een niet-metalen boot.

In principe is het mogelijk om, afhankelijk van het type antenne en de elektrische geleidbaarheid van het water, tot enkele tientallen meters waterkolom te meten. De ervaring van beide aan het onderzoek deelnemende radarbedrijven leert dat radarmetingen vanaf het wateroppervlak in Nederland, een enkele uitzondering daargelaten, goede resultaten leveren als het water niet dieper is dan circa 3 m.

Uit de reeds verrichtte onderzoeken blijkt dat de radartechniek ook een aantal praktische beperkingen heeft met betrekking tot de bevaarbaarheid van de watergang.

- De waterdiepte dient minimaal 30 cm te zijn i.v.m. inzetbaarheid buitenboordmotor (indien vanaf een vlot o.i.d. wordt gemeten vervalt deze eis);
- De watergang mag niet door een overmaat aan waterplanten in de bovenste 30 cm onbevaarbaar zijn (indien vanaf een vlot o.i.d. wordt gemeten vervalt deze eis);
- Ter plaatse van rietkragen kan niet worden gemeten omdat daar niet kan worden gevaren.
- De aanwezigheid van stuwten e.d. vertraagt de meetprocedure.

Als niet vrij met een boot gevaren kan worden kan bijvoorbeeld ook een vaartuig met radarapparatuur gesleept worden (jagen). Deze meetmethode is voornamelijk geschikt voor smalle sloten voorzien van een schouwpad o.i.d.

5.3 Positionering bij waterbodemonderzoek

Beide radarbedrijven die aan dit onderzoek meewerkten maken gebruik van satelliet navigatiesystemen (RTK-DGPS) om de positie van de metingen vast te leggen. Dit satelliet navigatiesysteem moet, om een goede positie te kunnen geven, verbinding hebben met een minimum aantal satellieten. Voor deze verbinding is 'vrij zicht' tussen het DGPS systeem en de satelliet noodzakelijk. Als het systeem optimaal werkt kunnen tot 2 posities per seconde worden vastgelegd. Gezien de benodigde nauwkeurigheid hebben de radarbedrijven beiden beschikking over een eigen systeem met een sub-meter nauwkeurigheid (de maximale afwijking van een meetpunt bedraagt 1 meter). Indien de toepassing een hogere nauwkeurigheid vereist kan ook een systeem met cm precisie (de maximale afwijking van een meetpunt bedraagt circa 1,5 à 2,5 cm) worden gebruikt.

De DGPS posities kunnen worden omgerekend naar Rijksdriehoek-coördinaten.

Als er hoge gebouwen e.d. langs de watergang staan kan een belangrijk deel van de beschikbare horizon afgedekt zijn door bebouwing, waardoor het verkrijgen van een juiste positie sterk wordt bemoeilijkt. Een verlaagd aangelegde watergang versterkt dit effect. Ook dicht geplante hoge bomen en bruggen kunnen dit probleem veroorzaken. Voor dergelijke watergangen dient de geschiktheid van het gebied voor DGPS navigatie altijd vooraf te worden nagegaan, zodat eventuele alternatieve positioneringssystemen kunnen worden overwogen.

5.4 Meetdichtheid

Omdat met georadar bijna continu metingen kunnen worden verricht, waarbij de positie van de metingen simultaan wordt vastgelegd is het niet noodzakelijk om het onderzoek langs vooraf vastgelegde meetlijnen uit te voeren. Doordat er 'willekeurig' kan worden gevaren kan eenvoudig een goede bedekking van het bevaarbare gedeelte van een watergang worden verkregen.

Een voorbeeld voor een procedure om een bruikbare bedekking van de waterbodem met meetgegevens te verkrijgen is voor een watergang van circa 6-15 m breed: Eerst wordt bijvoorbeeld een drietal langsvaarten (links, midden, rechts) gevaren, waarna een tweetal zigzaglijnen worden gevaren, waardoor de watergang van oever tot oever wordt doorgemeten.

Ook andere meetconfiguraties zijn mogelijk, zolang deze resulteren in een bedekking van de watergang met meetlijnen waarmee de gewenste onderzoeksdoelstelling kan worden gehaald.

Tijdens het varen (circa 3-10 km/uur) worden afhankelijk van het systeem en de gebruikte registratietijd circa 10 tot 60 individuele radarmetingen per seconde uitgevoerd. Simultaan worden 1 à 2 posities per seconde binnen het Rijksdriehoekstelsel vastgelegd.

5.5 Welke sliblaagdicken kunnen met radar worden waargenomen ?

Aangezien het radarsignaal in slib uitdempt, kan een te dikke sliblaag ervoor zorgen dat de onderkant van de laag niet meer in de radardata tot uiting komt. De ervaring leert dat meestal, afhankelijk van de samenstelling, van sliblagen dikker dan circa 1,5- 2,5 m alleen de bovenkant met radar kan worden vastgesteld. In kleilagen wordt het radarsignaal sterker gedempt dan in zand.

Het is onder goede omstandigheden mogelijk (mits referentie gegevens aanwezig zijn) om sliblagen te detecteren vanaf een dikte van enkele centimeters.

De mogelijkheid om sliblaagdicken rechtstreeks uit de radardata te bepalen is sterk afhankelijk van de complexiteit van de waterbodem en afhankelijk van de verschillen tussen waterbodem en sliblaag.

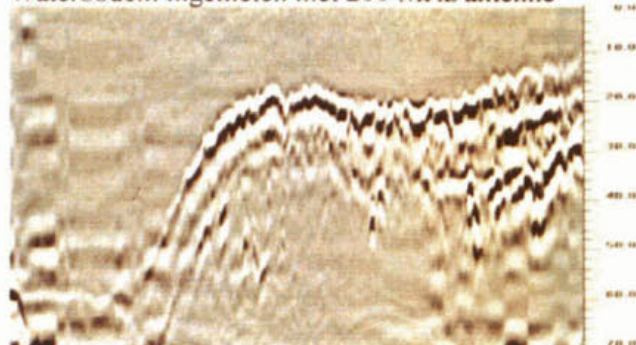
6. Waterbodemtoepassingen

In dit hoofdstuk wordt per paragraaf een waterbodemtoepassing van de georadartechniek beschreven.

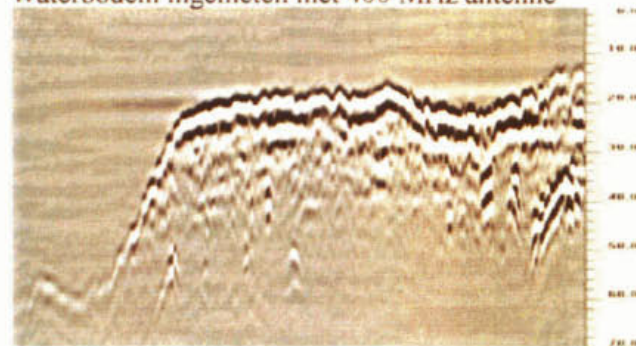
6.1 Vaststellen bovenkant waterbodem

In de radarprofielen is in het algemeen een duidelijke grens tussen water en de waterbodem zichtbaar. De diepteligging van deze laag kan goed in de data worden gevolgd.

Waterbodem ingemeten met 200 MHz antenne



Waterbodem ingemeten met 400 MHz antenne



De opbouw van de sliblaag is van groot belang voor de reflectie: Een radarsignaal wordt immers gereflecteerd op materiaalovergangen. Als de overgang water-slib een scherpe grens is, zal het radarsignaal op de diepte van de overgang reflecteren. Indien de overgang van water naar slib geleidelijk verloopt zal het radarsignaal daarentegen o.a. op verschillende dichtheden van het slib reageren. Het uiteindelijke doel van het onderzoek bepaalt de te detecteren grens in het slib ("dik water" of "stevig slib").

Figuur 6.1: Verschillende metingen leveren een vergelijkbaar beeld van de waterbodem

Ter illustratie zijn in figuur 6.1 een tweetal radarprofielen getoond. Het betreft twee profielen van het midden van een watergang nabij Edam die in het kader van het onderhavige onderzoek is onderzocht.

Deze profielen zijn op verschillende tijdstippen opgenomen door verschillende bedrijven. Het ene profiel is met een 200 MHz, het andere met een 400 MHz antenne opgenomen. De meetlijnen zijn niet exact gelijk.

In beide profielen is de waterbodem (bovenkant slib) duidelijk zichtbaar. Ondanks verschillen op detailniveau (veroorzaakt door verschillen in de positionering) is goed te zien dat beide metingen een vergelijkbaar beeld van de waterbodem geven.

Om de reistijd om te rekenen naar een juiste waterdiepte wordt de waterdiepte op een aantal plaatsen met een peilstok gemeten, en wordt nagegaan welke reistijden van het radarsignaal met deze waterdiepte corresponderen. Door een regressieanalyse op deze waarden uit te

voeren kan de relatie tussen de geregistreerde reistijden en de waterdiepte worden vastgesteld, en kunnen de radarmetingen worden omgerekend naar waterdiepten. Door de waterstand te relateren aan een peilschaal in het meetgebied kunnen de metingen ten opzichte van NAP worden weergegeven als (bijvoorbeeld) een contourkaart.

6.2 Vaststellen onderkant sliblaag

Het is de ervaring van de beide radarbedrijven dat het detecteren van de onderkant van de sliblaag minder eenduidig is dan bij de bovenkant het geval is. Wanneer er een fysisch contrast bestaat tussen de sliblaag en de onderliggende waterbodem is het met radar meestal goed mogelijk om een sliblaag te herkennen. Een goed voorbeeld hiervan is een 'modderige' sliblaag op een zandbodem.

Wanneer er geen duidelijke fysieke verschillen zijn tussen de sliblaag en de onderliggende bodem, wordt het aantonen van laagdikte met georadar ook moeilijk. Onderstaande voorbeelden zijn twee praktijkvoorbeelden van ervaringen bij voorgaande projecten.

- *Voorbeeld 1: Watergang met veenbodem in bebost gebied.*

In deze situatie blijkt het moeilijk om met georadar een sliblaag aan te duiden. Na het uitvoeren van boringen blijkt dat op de veenbodem een erg organisch rijke sliblaag aanwezig is, bestaand uit bladresten en verteert organisch materiaal. De overgang van sliblaag naar veenbodem is in dit geval een geleidelijke overgang van bladresten naar sterk verteerd organisch bodemmateriaal. De geleidelijke overgang is moeilijk waarneembaar met georadar.

- *Voorbeeld 2: Watergang met kleibodem.*

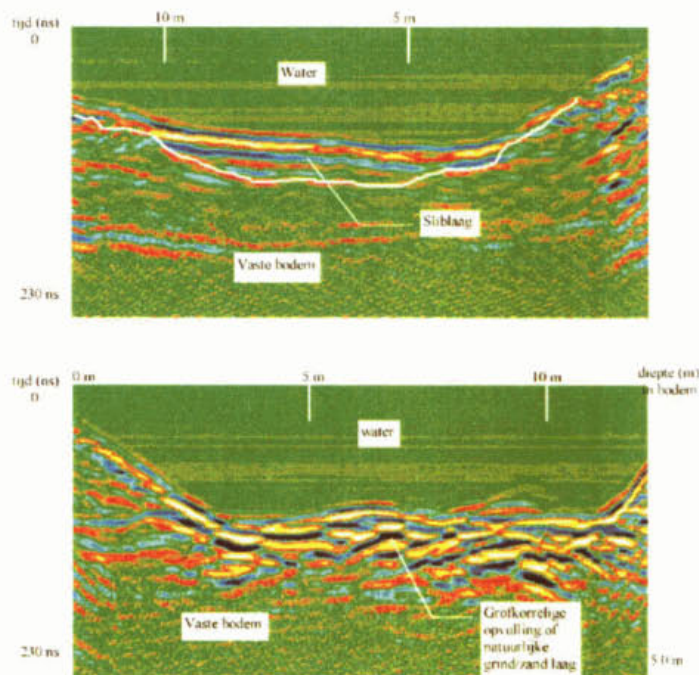
In deze situatie is een verontreiniging geconstateerd in een eerder afgezette laag. Over deze laag zijn nieuwere lagen afgezet. In dit onderzoek luidde de vraag of met georadar de verontreinigde laag is op te sporen. Uit de radarbeelden bleek dat bovenste slappe sliblaag en de daaronder iets stevigere sliblaag zichtbaar zijn maar dat de verontreinigde laag niet aantoonbaar was. Uit boringen blijkt dat de verontreinigde laag een sterk geconsolideerde sliblaag is gelijkend op en/of bestaand uit de kleibodem.

In de praktijk blijkt dat het soms ook in gevallen waar geen duidelijke reflectie aan de onderkant van de sliblaag optreedt, of waar de reflecties van de bovenkant en de onderkant van het slib overlappen mogelijk is om grens tussen het slib en de natuurlijke ondergrond aan te tonen. Dit komt omdat het 'radarbeeld' van een sliblaag anders is dan dat van de natuurlijke ondergrond. Als voorbeeld zijn in figuur 6.2. twee radarprofielen opgenomen

In deze figuur kan een separate en min of meer horizontaal gelaagde sliblaag herkend worden die op het natuurlijke bodemmateriaal ligt. De in de onderste figuur zichtbare 'verstoorde' ondergrond toont een deel van de waterbodem waar geen sliblaag aanwezig is.

Het vaststellen (indien mogelijk) van de onderkant van de sliblaag uit de radardata gebeurt momenteel nog grotendeels door middel van visuele interpretatie, gevolgd door het digitaliseren van de gevonden laaggrenzen. De interpretatie wordt onderbouwd door gebruik van referentiegegevens, zoals bijvoorbeeld enkele prikstokmetingen of multisampler profielen. Deze bewerking is de momenteel de meest arbeidsintensieve stap van het radaronderzoek.

Het vaststellen van de waterdiepte is momenteel eenvoudiger en minder bewerkelijk dan het vaststellen van sliblaagdikten. Het softwarematig identificeren van de sliblaag uit de radardata zou hierin verandering kunnen brengen. Deze mogelijkheid is momenteel echter nog in de testfase.



Figuur 6.2 Verskil tussen sliblaag en natuurlijk bodemmateriaal

6.3 Bepalen totale hoeveelheid slib en/of baggerspecie

Nadat de gewenste gegevens, zoals bijvoorbeeld waterdiepte, onderkant slib en ligging kabels en leidingen door interpretatie van uit de radardata zijn bepaald en vervolgens zijn gedigitaliseerd, wordt door middel van interpolatie-software een 3-dimensionaal model gegenereerd. Dit 3-D model wordt vervolgens voor verschillende doeleinden gebruikt;

- Er kan bijvoorbeeld contourkaart van de diepte van de waterbodem of van de dikte van de te verwijderen baggerspecielaag worden vervaardigd;
- Uit het 3-D model kunnen afhankelijk van de vraagstelling een variabele hoeveelheid dwarsprofielen worden gegenereerd welke zowel kunnen worden gebruikt om de resultaten van het onderzoek aan de probleembezitter te presenteren, als om de slibhoeveelheid te berekenen;
- Tevens bestaat de mogelijkheid om het 3-D model digitaal op te leveren zodat de probleembezitter de gegevens in zijn eigen digitale informatiesysteem kan opnemen.

Door het volume te berekenen tussen de bovenkant en de onderkant van het slib kan de totale hoeveelheid slib in een dwarsprofiel, of voor een gehele watergang worden bepaald.

Op een vergelijkbare manier kunnen kaarten worden vervaardigd van bijvoorbeeld de te verwijderen slibdikte, of de ligging van de onderkant van de sliblaag ten opzichte van NAP.

Voorgenoemde methode is de meest 'zuivere' manier om het slib in kaart te brengen. Omdat het niet altijd mogelijk is om de onderkant van de sliblaag te identificeren, maar wel goed mogelijk is om de waterdiepte in kaart te brengen kan de bepaling van het volume te verwijderen baggerspecie veelal ook op andere wijze plaatsvinden:

Bij onderhoudsbaggeren wordt de watergang vaak voorzien van een ideaal profiel (gebaseerd op leggergegevens, of afgeleid uit de breedte van de watergang). Als dit profiel bekend is, kan het volume slib tussen het 'ideale profiel' en de bovenkant van het slib worden berekend.

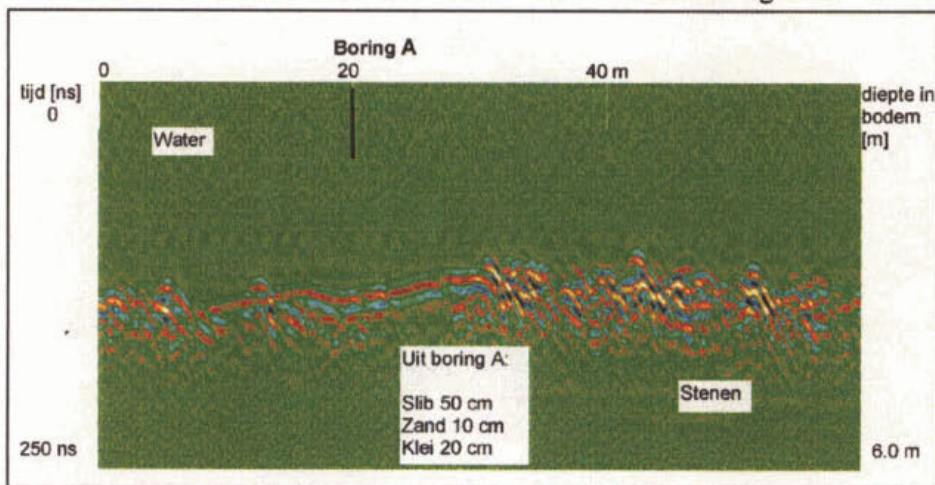
Om voor kwaliteitsbaggeren het volume verontreinigd slib te kunnen bepalen is het van belang om de ondergrens van het verontreinigd slib in beeld te krijgen. Met georadarmetingen kan dit onderscheid alleen worden gemaakt als het verontreinigde slib niet alleen chemisch, maar ook fysisch duidelijk verschilt van het niet-verontreinigde slib.

Afhankelijk van de vraag van de opdrachtgever kunnen (omdat de gegevens digitaal beschikbaar zijn en de gegevens in Rijksdriehoek-coördinaten zijn opgeslagen) de verkregen data aangeleverd worden in bijna ieder gewenst digitale uitwisselingsformaat, zodat de resultaten van een waterbodemonderzoek kunnen worden verwerkt in het beheersysteem van de waterbeheerder.

6.4 Waterbodemclassificatie

Omdat de waterbodem bij een radaronderzoek met een grote meetdichtheid wordt ingemeten en in de radarprofielen ook verschillen in de bodemstructuur worden waargenomen, kan men de waterbodem op basis van visuele of geautomatiseerde interpretatie in homogene deelgebieden indelen. De samenstelling van de deelgebieden kan vervolgens door middel van bijvoorbeeld boringen of andere ijkgegevens worden vastgesteld.

Een voorbeeld van verschillen in bodemstructuur is te zien in figuur 6.3



Figuur 6.3: Verschillen in waterbodemstructuur

Op deze wijze kan georadar gebruikt worden om duidelijkheid te verschaffen over de aanwezigheid en de verspreiding van bijvoorbeeld bestorting of puin in een watergang.

Door de grenzen van de waargenomen verschillende deelgebieden op kaart aan te geven, en de bodemopbouw van deze deelgebieden door middel van controlemonsters vast te stellen kan bijvoorbeeld een onderverdeling worden gemaakt in mate van voorkomen van puin of bestortingsmateriaal.

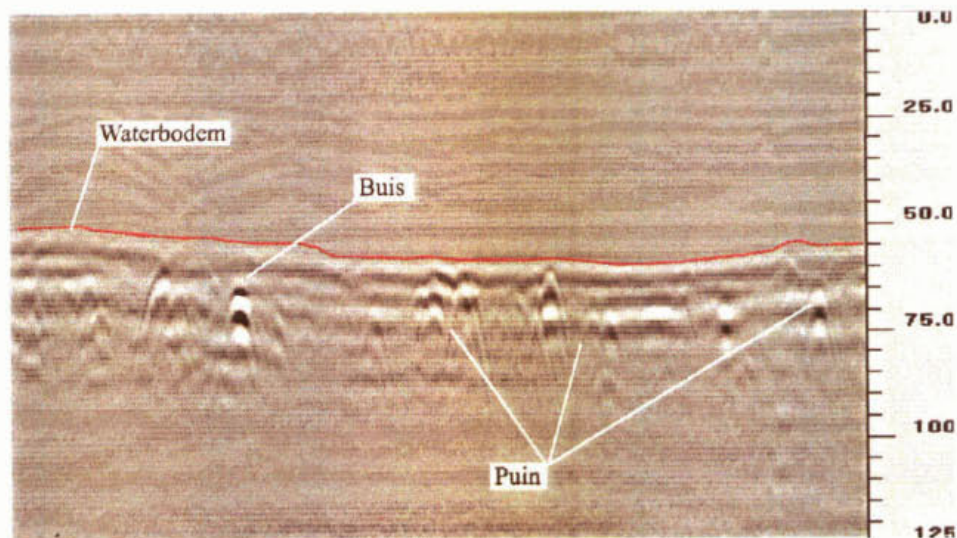
Het is momenteel niet mogelijk om met georadar chemische verontreinigen in een waterbodem te detecteren.

Wanneer over een bepaald traject duidelijke verschillen in de waterbodem aanwezig zijn, zij het van geologische of van andere oorsprong, dan is het veelal mogelijk om deze verschillen in de bodem met behulp van radarmetingen uit te karteren.

6.5 Detectie kabels, leidingen en objecten

Bij baggerwerk blijkt, vooral binnen de bebouwde kom, vaak dat er onbekende kabels en leidingen worden aangetroffen die beschadigd kunnen worden door het baggerwerk. Ook kunnen objecten (autowrakken e.d.) aanwezig zijn die het baggeren hinderen. Met behulp van radarmetingen kunnen deze objecten worden opgespoord.

Onder de waterbodem aanwezige kabels, leidingen en objecten veroorzaken, net als de waterbodem, reflecties van het radarsignaal (mits ze binnen het dieptebereik van de antenne liggen). Deze reflecties komen in de radarprofielen tot uiting als hyperbolen (een soort omgekeerde V-vorm). De top van de hyperbool geeft de positie van het object weer. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 6.4. Kabels en leidingen zijn herkenbaar aan het 'oplijnen' van deze hyperbolen op parallelle profielen. Puin en andere objecten geven vergelijkbare hyperbolen dan leidingen, maar kunnen in tegenstelling tot laatstgenoemden niet over meerdere parallelle profielen worden waargenomen.



Figuur 6.4: Radargram met aanduiding van ligging ondergrondse leiding

De laterale ligging van een object is veelal met een nauwkeurigheid van enkele decimeters aan te geven. Echter is het meestal niet mogelijk om een indicatie te geven van de diameter van de leiding. De diepteligging kan slechts indicatief worden aangegeven.

Omdat de coördinaten van de radarmetingen bekend zijn kan de waterbeheerder een digitaal overzicht (tekening, tabel, database, 'Stekkerdoos Water') krijgen van de ligging en indicatieve diepte van kabels, leidingen en objecten in een watergang.

7. Vergelijking met andere beschikbare onderzoekstechnieken

Naast de radartechniek bestaan ook groot aantal andere methoden waarmee waterbodemonderzoek kan worden uitgevoerd. Deze methoden zijn in te delen in discrete methoden, die puntinformatie opleveren, en methoden die (semi)continue informatie leveren. Onderstaande (niet volledige) opsomming geeft een overzicht van de meest gebruikte methoden die in Nederland worden toegepast:

Discontinu meetmethoden

- Peilstok metingen;
- Multisampler metingen (en andere boormethoden).

(Semi)continue methoden

- Akoestische (seismische) technieken.

De bovengenoemde onderzoekstechnieken worden in dit hoofdstuk vergeleken met de radartechniek.

Peilstokmetingen

Bij peilstokmetingen wordt de bovenkant en de onderkant van het slib manueel vastgesteld. De bovenkant en onderkant van de sliblaag worden gerelateerd aan de mate van weerstand die een opnemer voelt als een stok (soms voorzien van een kleine schijf) in de waterbodem wordt gedrukt.

De metingen leveren in tegenstelling tot radar puntinformatie op. Bovendien zijn resultaten van de peilstokmetingen in zekere mate persoonsafhankelijk.

Omdat deze metingen logistiek eenvoudig uit te voeren zijn wordt het omrekenen van de radardata naar waterdiepte en slibdikten toch vaak gebruik gemaakt van peilstokmetingen.

De metingen worden niet beperkt door ondiep water.

Multisampler metingen (en andere zuigerboormethoden)

Bij multisampler metingen wordt een boorkern van de waterbodem in een doorzichtige buis gestoken/gezogen. Hierbij is de opbouw van de waterbodem goed waarneembaar.

De metingen leveren in tegenstelling tot radar puntinformatie op. De methode levert 'harde' boorbeschrijvingen op. Daarnaast wordt het veelal gebruikt voor het nemen van slibmonsters.

Omdat deze metingen logistiek eenvoudig uit te voeren zijn, wordt het omrekenen van de radardata naar waterdiepte en slibdikten vaak gebruik gemaakt van enkele multisampler metingen.

De metingen worden niet beperkt door ondiep water.

Akoestische (seismische) technieken

Van de hier beschreven methoden zijn de akoestische technieken het meest verwant met de radartechniek. Hoewel beiden reageren op een verschillende fysische parameter van de waterbodem lijken de veldprocedure en de mogelijkheden van dataverwerking bij deze technieken sterk op elkaar. Ook leveren beide methoden (semi) continue profielen. Er zijn echter een aantal belangrijke verschillen:

Akoestische technieken kunnen in ondiep water niet goed ingezet worden in verband met het multiple effect: hierbij wordt het signaal van de waterbodem overschaduwd door herhaaldelijke sterke reflecties van het signaal tussen de waterbodem en de antenne. Radar heeft hier minder last van. Waar met radar bovendien vanaf het wateroppervlak wordt gemeten, steekt de zender/ontvanger van een akoestisch apparaat meestal circa 50 - 80 cm onder water.

In ondiep, zoet water wordt verwacht dat met radarmetingen betere resultaten worden behaald dan met akoestische technieken, terwijl bij grotere waterdiepten dan circa 3 tot 5 m, en/of brak of zout water de voorkeur uitgaat naar het toepassen van akoestische technieken.

Akoestische technieken kunnen (in tegenstelling tot de radartechniek) de waterbodem niet penetreren als er gas in de ondergrond aanwezig is (komt veel voor bij veengronden en sliblagen).

Samenvatting

In tabel 7.1 staan enkele kengetallen van de bovengenoemde onderzoekstechnieken kort beschreven.

Tabel 7.1: Samenvatting toepasbaarheid onderzoekstechnieken

Methodiek:	Toepasbaarheid		Waterdiepte		Nauwkeurigheid (cm)
	Zout/brak Water	Zoet water	Van (m)	Tot (m)	
Peilstokmeting	+	+	0	7 à 8	2 à 4
Multisampler	+	+	0	7 à 8	2 à 4
Georadar	-	+	0,1 à 2,5	2,5 à 3,5	2 à 4
Akoestisch	+	+	2 à 3	~	2 à 4

8. Georadar praktijk

8.1 Inleiding

Ten behoeve van het voorliggende onderzoek zijn metingen uitgevoerd op verschillende waterbodemtypen. Zo zijn onderzoeken uitgevoerd op watergangen met een:

- Zandbodem (de Weezebeek in Almelo);
- Kleibodem (Mauriksewetering te Mourik);
- Klei/veenbodem (de Zije in polder Zeevang (bij Edam)).

De meetwerkzaamheden zijn tussen de twee aan het onderzoek deelnemende radarbedrijven verdeeld. Het ene radarbedrijf heeft radarmetingen verricht in de Weezebeek en de Zije, het andere radarbedrijf heeft metingen uitgevoerd in de Mauriksewetering en de Zije. De Zije in polder Zeevang is door beide radarbedrijven onafhankelijk van elkaar doorgemeten.

In de volgende paragrafen worden per locatie de uitgevoerde waterbodemonderzoeken beschreven en worden de resultaten gepresenteerd.

Vervolgens worden de resultaten van de onderzoeken vergeleken.

8.2 Onderzoek Weezebeek te Almelo (zandondergrond)

Algemeen

Het onderzoeksgebied is gelegen aan de zuidkant van Almelo (zie bijlage 1A) en heeft een lengte van circa 1,5 km en een breedte van circa 9 m. Een deel van het talud van de Weezebeek is voorzien van een steenbestorting.

Doel onderzoek

Het doel van het onderzoek was door middel van georadarmetingen vanaf het wateroppervlak een beeld te geven van de waterdiepte langs een deel van de Weezebeek. Daarnaast is nagegaan of het mogelijk was om de dikte van de aanwezige sliblaag rechtstreeks uit de verzamelde radardata te bepalen. Ook is nagegaan of de hoeveelheid baggerspecie uit de radardata kan worden bepaald.

Om na te gaan wat de bodemopbouw in de Weezebeek is, en hoe deze tot uiting komt in de radardata is bovendien een dwarsprofiel (ligging profiel aangegeven in bijlage 1B) door de Weezebeek met radar doorgemeten, waarbij ook een aantal boringen (middels een multisampler) en handpeilingen (prikstok) zijn uitgevoerd.

Beschrijving radarveldwerk (peilingen)

De radarmetingen ten behoeve van de peilingen zijn uitgevoerd op 8 en 11 augustus 1999. De metingen zijn uitgevoerd vanaf het wateroppervlak. Na enkele testmetingen waarbij verscheidene antennes en instellingen zijn uitgetest, is gekozen om de metingen met een 200 MHz antenne uit te voeren.

Tijdens het veldwerk was sprake van een matige bevaarbaarheid: enerzijds was het waterpeil in een groot gedeelte van de beek zeer laag (enkele decimeters), anderzijds waren er veel waterplanten aanwezig.

De metingen zijn uitgevoerd langs een drietal langlijnen en meerdere zigzaglijnen. De ligging van de meetlijnen is aangegeven in bijlage 1B. De positiebepaling is uitgevoerd met behulp van een DGPS (differential global positioning system) met sub-meter precisie

(maximale afwijking positie minder dan 1 meter). Een deel van de metingen is uitgevoerd met een RTK-DGPS (real time kinematic differential global positioning system) met cm-precisie (maximale afwijking positie circa 1,5 - 2,5 cm).

Het dwarsprofiel door de Weezebeek (radarmetingen en boringen)

Om na te gaan wat de bodemopbouw in de Weezebeek is, en hoe deze tot uiting komt in de radardata is een dwarsprofiel (ligging profiel aangegeven in bijlage 1B) door de Weezebeek met radar doorgemeten, waarbij ook een aantal boringen (middels een multisampler) en handpeilingen (prikstok) zijn uitgevoerd.

Het radarprofiel en de boorbeschrijvingen staan aangegeven in bijlage 1E. Uit deze boringen blijkt dat de ondergrond van de Weezebeek sterk heterogeen van samenstelling is. Lagen slib en lagen zand wisselen elkaar af. Er is geen sprake van een duidelijke laag slib die op een zandige 'natuurlijke' ondergrond ligt.

Bepalen waterdiepte uit radardata

De waterbodem was goed zichtbaar in de radardata. Het omrekenen van de radardata naar waterdiepte heeft plaatsgevonden aan de hand van een vergelijking van enkele prikstokmetingen met de op die punten geregistreerde reistijd van de radargolf. Deze vergelijking is opgenomen als bijlage 1D. Een lineaire regressie van de meetpunten leverde een correlatie van $R^2 = 0,99$ op.

Deze goede correlatie betekent dat uit de radardata een bruikbare waterdiepte kan worden afgeleid. De resultaten van de regressie zijn gebruikt voor het omrekenen van de metingen naar een waterdiepte. De metingen van 11 augustus zijn gecorrigeerd tot het niveau van de metingen van 8 augustus (hierbij is gebruik gemaakt van meetpunten die op beide dagen zijn geregistreerd).

Bij het onderhavige onderzoek was sprake van een tweetal factoren welke de kwaliteit van de waterdieptekartering beïnvloed hebben. Het betreft:

- Tegen de verwachting in was het waterpeil tijdens het veldwerk niet min of meer constant, maar daalde circa 10-20 cm tijdens het veldwerk (waarschijnlijk in verband met onderbemaling vanwege verwachte zware regenval);
- Het waterpeil in de beek blijkt een aanzienlijk verhang te hebben (volgens mondelinge mededeling van het waterschap mogelijk 10 -20 cm verhang over 1 km), dat bovendien afhangt van de afvoer. Door het ontbreken van een bovenstroomse en een benedenstroomse peilschaal bleek het niet mogelijk om te corrigeren voor in de beek optredende verval.

Van het onderzoeksgebied is een kaart vervaardigd van de uit de radardata berekende waterdiepte (de waterdiepten zijn berekend voor een regelmatig raster van 1 x 1 m). Hoewel deze kaart door voorgenoemde factoren niet geheel correct is geeft de kaart toch een beeld van de variaties van de waterdiepte langs de beek. Deze contourkaart is opgenomen als bijlage 1C.

De kaart van de waterdiepte is vervaardigd met behulp van 8.782 uit de radardata afgeleide waterdiepten. Dit komt gemiddeld neer op 1 meetwaarde per 1,43 m² wateroppervlak.

Directe detectie slibdikte uit radarmetingen

Na rekenkundig bewerken van de radardata (filteren e.d. om stoorsignalen te verwijderen en de signaal- ruis verhouding te optimaliseren) bleek dat er in de radardata van de Weezebeek geen sliblaag te herkennen was. Uit de boringen van het dwarsprofiel blijkt dat er geen sprake is van een duidelijke laag slib die op een zandige 'natuurlijke' ondergrond ligt, maar dat de ingespoelde laag uit een complexe afwisseling van fijner en grover materiaal bestaat

Bepalen baggerspeciehoeveelheid uit radarmetingen en voorkeurprofiel

In de Weezebeek bleek uit de tijdens het veldwerk uitgevoerde handboringen dat ter plaatse van het onderzoeksgebied geen duidelijke sliblaag aanwezig was, zodat geen slibvolume kon worden bepaald.

Daarom is nagegaan of het mogelijk was om de hoeveelheid baggerspecie te bepalen. Hierbij is de hoogteligging van de waterbodem vergeleken met het voorkeurprofiel van de watergang. Doordat het wateroppervlak (en daarmee ook de gemeten waterbodem) langs het onderzochte gedeelte van de beek niet goed aan een NAP hoogte te koppelen was (geen peilschalen, sterk verhang, waterstand varieerde tijdens meten) was dit niet goed mogelijk.

8.3 Onderzoek Maurikse Wetering te Maurik (kleiondergrond)

Resultaten Georadarmeting slib op klei, Maurikse Wetering te Maurik.

Het onderzoeksgebied betreft ca. 2,3 kilometer van de Maurikse wetering te Maurik. Zie bijlage 2A. Het betreft een traject welke grotendeels in de Betuwse klei gesitueerd is. De oever is grotendeels vrij van objecten, uitgezonderd het gedeelte nabij het Amsterdam-Rijnkanaal waar aan de zuidkant een populierenbos aanwezig is.

De bomen hebben een aantal malen storing veroorzaakt bij de signaal ontvangst van de DGPS-unit.

Ten tijden van de meting was de natuurlijke oeverbegroeiing aanwezig. Deze was niet hinderlijk in relatie tot onbegaanbaarheid/onbevaarbaarheid. Waar oeverplanten aanwezig zijn is de radarantenne er doorheen gebracht tot aan de oeverlijn.

Het traject is vlakdekkend ingemeten door middel van willekeurige vaarlijnen met de 200 MHz antenne, zie bijlage 2B. Gemeten is tot op de waterbodem (ca. 0,8 tot 1,5 m-wateroppervlak) en tot ca. 2m in de waterbodem. Tevens zijn er metingen verricht met de 500 MHz antenne om gedetailleerdere beelden te krijgen van de verschillende overgangsfases/lagen. Deze 500 MHz metingen zijn tevens gebruikt voor de inpeiling met radar ter vergelijking met de handmatige boringen, zie raai map-1 en map-2 in bijlage 2B.

Resultaten peilgegevens georadar

De data van de radar is met de computer verwerkt en de verkregen diepte is vervolgens gekoppeld aan de x,y-positie verkregen met het DGPS-systeem. Deze resultaten zijn vervolgens verrekend tot een massief 3-D model. Zie bijlage 2C. Dit 3-D model kan vervolgens worden gebruikt voor de vergelijking met de peilgegevens in het veld. In bijlage 2C zijn twee deellokaties uitvergroot weergegeven als voorbeeld van een kleurenpresentatie van de dataset.

Om de radardata in tijd om te kunnen zetten naar waterdiepte is het noodzakelijk om de tijdsgebonden data af te ijken op peiling in afstand. Dit is in de Maurikse Wetering gebeurd aan de hand van een handmatige peiling op een dwarsraai welke ook met radar ingemeten is. De gegevens van deze meting staan weergegeven in bijlage 2D. Bij een vergelijking van de handmetingen met de radarmetingen werd een correlatie van $R^2 = 0,97$ bepaald, hetgeen een goede overeenkomst aangeeft tussen de uit de radarmetingen bepaalde diepten en de handmatig gemeten diepten data. Dit wordt in de bijgevoegde grafiek gepresenteerd.

Resultaten conventionele peiling

Polderdistrict Betuwe heeft 9 profielen gepeild. Daarnaast zijn er 2 profielen met radar

ingemeten en handmatig gepeild en geboord door MAP. De ligging van de profielen is weergegeven in bijlage 2B.

Op de locatie van de handmatig gepeilde profielen zijn naderhand profielen uit het 3-D model van de radardata gehaald. Deze profielen zijn met elkaar vergeleken in bijlage 2E. Met uitzondering van de profielen D1-29 en D1-28 komen de resultaten goed overeen. De diepteverschillen in deze twee profielen worden waarschijnlijk veroorzaakt door een verschil in positionering: Bij het radaronderzoek werd een juiste positionering door de aanwezige begroeiing (lokaal slechte ontvangst DGPS-signaal) verstoord. De door het Polderdistrict opgegeven begin- en eindpunten van het conventionele profiel bleken voor deze twee profielen niet op de oever van de watergang te liggen. Hierdoor zijn er voor deze profielen afwijkingen in de diepte en de breedte van de watergang.

Sliblaag dikte

De sliblaagdikte is op twee dwarsprofielen nader bekeken: raai map-1 en map-2. De waterbodembouw van deze profielen is bepaald en weergegeven in bijlage 2F. De boringen zijn genummerd als zijnde B1 t/m B7. Deze boringen zijn in bijlage 2G geprojecteerd in de radardata. Ter presentatie van de radardata is aan elke radarwaarde in de tijd een kleurcode meegegeven. Deze kleuren zijn dus relatief en op amplitude onderverdeeld.

In de radardata is een begrenzing van de meest significante laagovergang aangegeven, aangenomen als zijnde sliblaag en benadrukt door een blauwe lijn. Tevens is op de plaats waar de boringen zijn gezet de dikte van de laag, aangenomen als zijnde sliblaag, aangegeven in nanoseconden.

In bijlage 2H is de correlatie bepaald tussen de handmatig gemeten slibdikten en de slibdikten zoals deze uit de radardata zijn afgeleid. Voor de profielen map-1 en map-2 bedraagt deze correlatie $R^2 = 0,83$ respectievelijk $R^2 = 0,94$. Wanneer de data van beide profielen samen worden gevoegd word een correlatie van $R^2 = 0,85$ gevonden.

8.4 Onderzoek Zijde nabij Edam, (veenondergrond, bedrijf A)

Resultaten Georadarmeting slib op veen, polder de Zeevang.

Het onderzoeksgebied betreft ca. 1,0 kilometer, zie bijlage 3A.

Het betreft een traject welke grotendeels in het veenweide gebied gesitueerd is. De oever is grotendeels vrij van objecten, uitgezonderd het zuidelijke gedeelte waar begroeiing van bomen aanwezig is.

De bomen hebben een aantal malen storing veroorzaakt bij de signaalontvangst van de DGPS-unit.

Ten tijden van de meting was de natuurlijke oeverbegroeiing aanwezig. Deze was niet hinderlijk vanwege onbegaanbaarheid/onbevaarbaarheid. Waar er oeverplanten aanwezig waren is de radarantenne er doorheen gebracht tot aan de oeverlijn.

Het traject is vlakdekkend ingemeten door middel van willekeurige vaarlijnen met de 200 MHz antenne, zie bijlage 3B. Gemeten is tot op de waterbodem (tot ca 0.7 m - wateroppervlak) en tot ca. 4 m in de waterbodem.

Resultaten peilgegevens georadar

De data van de radar is met de computer verwerkt en de verkregen diepte is vervolgens gekoppeld aan de x,y-positie verkregen met het DGPS-systeem. Deze resultaten zijn vervolgens verrekend tot een massief 3-D model. Zie bijlage 3C. Dit 3-D model kan vervolgens worden gebruikt voor de vergelijking met de peilgegevens in het veld. In bijlage 3C is het traject weergegeven als voorbeeld van een kleurenpresentatie van de dataset.

Om de radardata in tijd om te kunnen zetten naar waterdiepte is het noodzakelijk om de tijds gebonden data af te ijken op peiling in afstand. Dit is gebeurd aan de hand van een handmatige peiling op een dwarsraai welke ook met radar ingemeten is. De gegevens van deze meting staan weergegeven in bijlage 3D. De regressiecoëfficiënt bedraagt $R^2 = 0.94$ wat een goede correlatie aangeeft tussen de radardata in tijd en de handmatig ingepeilde data. Dit wordt in de bijgevoegde grafiek in bijlage 3D gepresenteerd.

Resultaten peilgegevens conventioneel

Helaas zijn voor dit traject vanuit het waterschap geen peilgegevens voorhanden. De vergelijking die gemaakt kon worden is op basis van de afijkings gegevens.

Bepalen baggerspecie hoeveelheid uit radarmetingen en voorkeurprofiel

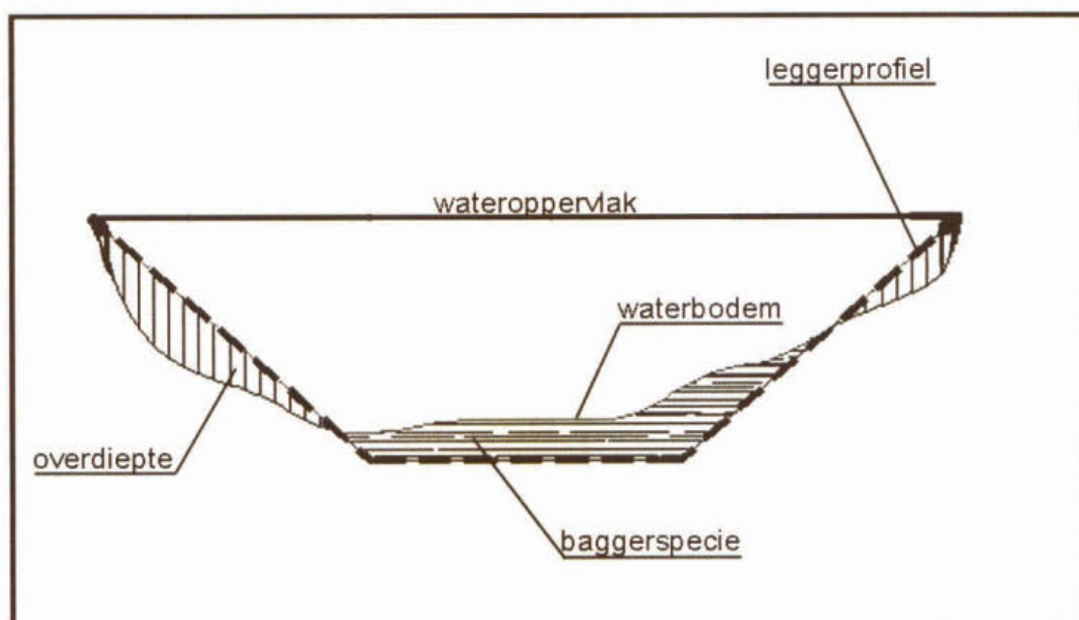
Omdat de slibdikte bij het onderzoek van de Zije niet rechtstreeks uit de radardata kon worden afgeleid is vervolgens nagegaan of het mogelijk was om de hoeveelheid baggerspecie te bepalen. Hierbij wordt de hoogteligging van de waterbodem vergeleken met het voorkeurprofiel van de watergang.

Navraag bij het waterschap leverde op dat de streefdiepte van de Zije 80 cm waterkolom is. Alleen het midden van de watergang zal worden gebaggerd. Uit deze gegevens is door de beide radarbedrijven gezamenlijk het onderstaande voorkeurprofiel vastgesteld :

Het voorkeurprofiel bestaat uit een 6 m brede strook in het midden van de watergang die tot een waterdiepte van 0,8 m wordt gebaggerd. Daarbuiten loopt het profiel langs een rechte lijn omhoog tot de oever, waar de diepte van het voorkeurprofiel op 0 m is gesteld. Dit alles is gecorreleerd aan NAP.

Om een goede vergelijking van de door beide bedrijven onafhankelijk van elkaar bepaalde baggerspecie-hoeveelheden te kunnen maken is bij de berekening door beide radarbedrijven gebruik gemaakt van een zelfde oeverlijn en hetzelfde voorkeurprofiel. De resultaten staan aangegeven in tabel 8.4.1.

In figuur 8.1 is de betekenis van wat de in deze tabel gebruikte termen (baggerspecievolume en volume buiten voorkeurprofiel (overdiepte)) weergegeven.



Figuur 8.1: definitie baggerspecie en volume buiten leggerprofiel (overdiepte).

Tabel 8.4.1: Resultaten baggerspecie berekeningen Zije

Wateroppervlak	24.638 m ²
In-situ volume te verwijderen baggerspecie	4.932 m ³
In-situ volume buiten leggerprofiel (overdiepte)	3.665 m ³
Watervolume voor baggeren	8.415 m ³
Gemiddelde waterdiepte voor baggeren	0,34 m ¹

8.5 Onderzoek Zije nabij Edam (veenondergrond, bedrijf B)

Algemeen

Het onderzoeksgebied is gelegen in de polder Zeevang ten noorden van Edam en heeft een lengte van circa 1 km en een breedte van circa 10-20 m. De ligging van het onderzoeksgebied is aangegeven in bijlage 3A.

Doel onderzoek

Het doel van het onderzoek was door middel van georadarmetingen vanaf het wateroppervlak een beeld te geven van de waterdiepte langs een deel van de Zije. Daarnaast is nagegaan of het mogelijk was om de dikte van de aanwezige sliblaag rechtstreeks uit de verzamelde radardata te bepalen. Ook is nagegaan of de hoeveelheid baggerspecie uit de radardata kan worden bepaald.

Om na te gaan wat de bodemopbouw in de Zije is, en hoe deze tot uiting komt in de radardata is bovendien een dwarsprofiel door de Zije met radar doorgemeten. Langs het profiel zijn prikstokmetingen uitgevoerd en zijn boringen uitgevoerd met behulp van een multisampler en een veenboor.

Beschrijving radarveldwerk (peilingen)

De radarmetingen ten behoeve van de peilingen zijn uitgevoerd op 10 augustus 1999. De metingen zijn uitgevoerd vanaf het wateroppervlak. Na enkele testmetingen waarbij verscheidene antennes en instellingen zijn uitgetest, is gekozen om de metingen met een 400 MHz antenne uit te voeren.

Tijdens het veldwerk bleek dat over een groot gedeelte van de watergang slechts circa 30-40 cm water aanwezig was.

De metingen zijn uitgevoerd langs een drietal langlijnen en meerdere zigzaglijnen. De ligging van de meetlijnen is aangegeven in bijlage 4A. De positiebepaling is uitgevoerd met behulp van een RTK-DGPS (Real time kinematic differential global positioning system) met cm-precisie (maximale afwijking positie circa 1,2-2,5 cm). Hiertoe is een referentiestation geplaatst op een vooraf in het Rijksdriehoeknet ingemeten positie langs de watergang.

Het dwarsprofiel door de Zije (radarmetingen en boringen)

Om na te gaan wat de bodemopbouw in de Zije is, en hoe deze tot uiting komt in de radardata is een dwarsprofiel door de Zije met radar doorgemeten. Hierbij zijn ook handpeilingen (prikstok metingen) zijn uitgevoerd waarbij een drietal bodemlagen is onderscheiden. De prikstokmetingen zijn geïjkt met behulp van een multisampler en een veenboor (zie bijlage 3D).

Uit de prikstokmetingen en de monsternamen blijkt dat de ondergrond van de Zije (onder de organische sliblaag) overwegend uit veen bestaat. Vanaf een diepte van circa NAP - 3,6 à 3,7 m wordt zware klei aangetroffen.

Bepalen waterdiepte uit radardata

De waterbodem was goed zichtbaar in de radardata. Het omrekenen van de radardata naar waterdiepte heeft plaatsgevonden aan de hand van een vergelijking van enkele prikstokmetingen met de op die punten geregistreerde reistijd van de radargolf. Deze vergelijking is opgenomen als bijlage 4B. Een lineaire regressie van de meetpunten leverde een correlatie op van $R^2 = 0,96$ voor de bovenkant van het slib.

Deze goede correlatie betekent dat uit de radardata een bruikbare waterdiepte kan worden afgeleid. De resultaten van de regressie zijn gebruikt voor het omrekenen van de metingen naar waterdiepte. De NAP hoogte van het wateroppervlak is afgelezen van een peilschaal aan de noordkant van het meetgebied.

Van het onderzoeksgebied is een kaart vervaardigd van de uit de radardata berekende waterdiepte (de waterdiepten zijn berekend voor een regelmatig raster van 1 x 1 m). De kaart van de waterdiepte is vervaardigd met behulp van 8.452 uit de radardata afgeleide waterdiepten. Dit komt gemiddeld neer op 1 meetwaarde per 2,67 m² wateroppervlak. Een contourkaart van de ligging van de waterbodem is opgenomen als bijlage 4C.

Directe detectie slib uit radarmetingen

Na rekenkundig bewerken van de radardata (filteren e.d. om stoorsignalen te verwijderen en de signaal- ruis verhouding te optimaliseren) bleek dat de onderkant van de sliblaag in de profielen van de Zije niet in de radardata tot uiting kwam. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat de organische sliblaag te weinig van de onderliggende veenlaag verschilt om een duidelijke reflectie van het radarsignaal te veroorzaken. Het direct bepalen van de slibdikte uit de radarmetingen blijkt hierdoor voor de Zije niet mogelijk.

De waterbodem (= bovenkant slib) komt wel duidelijk tot uiting in de radarprofielen.

Bepalen baggerspeciehoeveelheid uit radarmetingen en voorkeurprofiel

Omdat de slibdikte bij het onderzoek van de Zije niet rechtstreeks uit de radardata kon worden afgeleid is vervolgens nagegaan of het mogelijk was om de hoeveelheid baggerspecie te bepalen. Hierbij wordt de hoogteligging van de waterbodem vergeleken met het voorkeurprofiel van de watergang.

Navraag bij het waterschap leverde op dat de streefdiepte van de Zije 80 cm waterkolom is. Alleen het midden van de watergang zal worden gebaggerd. Uit deze gegevens is door de beide radarbedrijven gezamenlijk het onderstaande voorkeurprofiel vastgesteld :

Het voorkeurprofiel bestaat uit een 6 m brede strook in het midden van de watergang die tot een waterdiepte van 0,8 m wordt gebaggerd. Daarbuiten loopt het profiel langs een rechte lijn omhoog tot de oever, waar de diepte van het voorkeurprofiel op 0,0 m is gesteld.

Om een goede vergelijking van de door beide bedrijven onafhankelijk van elkaar bepaalde baggerspecie-hoeveelheden te kunnen maken is bij de berekening door beide radarbedrijven gebruik gemaakt van een zelfde oeverlijn en hetzelfde voorkeurprofiel.

Voor deze berekening zijn de waterdiepten en het voorkeurprofiel herberekend voor een raster van 0,5 x 0,5 m. De resultaten staan aangegeven in tabel 8.5.1:

Tabel 8.5.1: Resultaten baggerspecie berekeningen Zije

Wateroppervlak	22.600 m ²
In-situ volume te verwijderen baggerspecie	4.810 m ³
In-situ volume buiten leggerprofiel (overdiepte)	1.650 m ³
Watervolume voor baggeren	8.925 m ³
Gemiddelde waterdiepte voor baggeren	0,395 m ¹

Het aantal cm te verwijderen baggerspecie staat op kaart aangegeven in bijlage 4D
Op deze kaart zijn ook de gebieden met overdiepte aangegeven.

9. Evaluatie en conclusies

Bepalen waterdiepte met georadar

Het uitgevoerde onderzoek heeft aangetoond dat georadar een geschikt instrument is om de waterdiepte van ondiepe zoete watergangen (waterdiepte minimaal circa 0,3 tot maximaal circa 2,5 à 3,5 m) in kaart te brengen. De methode is niet geschikt voor zout of brak water.

Een vergelijking van radarmetingen met middels conventioneel onderzoek bepaalde waterdiepten leverde in een viertal onderzochte situaties correlaties tussen $R^2 = 0,94$ en $0,99$ op. Metingen die door twee onafhankelijke bedrijven op eenzelfde locatie zijn uitgevoerd leverden resultaten die sterk overeenkomen.

De meetmethode levert goede resultaten voor alle onderzochte bodemtypen (klei, veen, zand).

Een voorgenomen vergelijking van de resultaten van een radarpeiling met de resultaten van een door een waterschap uit te voeren akoestische peiling kon niet worden gerealiseerd, omdat de akoestische metingen niet zijn uitgevoerd.

De resultaten van een peiling door middel van georadar kunnen in een aantal vormen worden aangeleverd:

- Digitale aanlevering berekende waterdiepte (als file met x, y ,waterdiepte);
- Contourkaarten;
- Profielen.

Bepalen baggerspeciehoeveelheid met georadar

Het uitgevoerde onderzoek heeft aangetoond dat georadar een geschikt instrument is om de hoeveelheid in-situ baggerspecie in ondiepe zoete watergangen (waterdiepte minimaal circa 0,3 tot maximaal circa 2,5 à 3,5 m) in kaart te brengen. De methode is niet geschikt voor zout of brak water.

De hoeveelheid in-situ baggerspecie wordt bepaald als het volume dat tussen de actuele waterbodem en het voorkeurprofiel van de watergang aanwezig is.

In het project is door twee onafhankelijke radarbedrijven de hoeveelheid baggerspecie van eenzelfde onderzoekstraject bepaald. Om de gegevens goed te kunnen vergelijken hebben beide bedrijven in hun berekening gebruik gemaakt van dezelfde oeverlijnen en hetzelfde voorkeurprofiel. De resultaten van de berekeningen zijn aangegeven in tabel 9.1

Tabel 9.1: Resultaten baggerspecie berekeningen Zije

	Bedrijf A	Bedrijf B
In-situ volume te verwijderen baggerspecie	4.932 m³	4.810 m³

Aangezien de resultaten van de twee onafhankelijke onderzoeken goed overeenkomen blijkt dat de reproduceerbaarheid van de baggerspecie-hoeveelheidsbepaling met georadar zeer goed is.

De resultaten van de bepaling van de hoeveelheid baggerspecie door middel van georadar kunnen in een aantal vormen worden aangeleverd:

- Digitale aanlevering (als file met x,y,waterdiepte, diepte voorkeurprofiel, baggerspeciehoeveelheid);
- Contourkaarten;
- Profielen;
- Baggerspeciehoeveelheden.

Bepalen slibdikte met georadar

Voor het bepalen van de sliblaagdikte is het noodzakelijk dat zowel de bovenkant als ook de onderkant van de sliblaag in de radardata tot uiting komen.

De voorwaarden waaraan een onderzoekslocatie moet voldoen om de sliblaagdikte direct uit georadarmetingen te kunnen bepalen zijn momenteel niet goed bekend. Bij de vier uitgevoerde onderzoeken is de directe detectie van de sliblaag in één geval mogelijk geweest (kleigebied). In de andere drie gevallen kon de onderkant van de sliblaag niet worden waargenomen (veengebied), of was er geen sprake van een goed gedefinieerde sliblaag (zandgebied).

Eerdere ervaringen van de deelnemende radarbedrijven gaven aan dat de directe detectie van een sliblaag voornamelijk bij gebieden met een zandondergrond mogelijk zou zijn.

Een vergelijking van uit radarmetingen bepaalde slibdikten met middels conventioneel onderzoek bepaalde slibdikten leverde voor de klei-locatie correlaties op van $R^2 = 0,84$ tot 0,94.

De resultaten van een slibdiktemeting door middel van georadar kunnen in een aantal vormen worden aangeleverd:

- Digitale aanlevering (als file met x,y,waterdiepte, onderkant sliblaag, dikte sliblaag);
- Contourkaarten;
- Profielen;
- Slibvolume.

10. Kosten - baten analyse waterbodemonderzoek met georadar

Algemeen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de kosten en de baten van een waterbodemonderzoek met behulp van georadar. Hierbij wordt voornamelijk ingegaan op waterdieptemetingen (peilingen) en het bepalen van baggerspeciehoeveelheden omdat deze toepassingen momenteel bij waterbeheerders grotendeels met conventionele methoden worden gerealiseerd.

Het bepalen van de waterdiepte (peilingen) wordt door een groot aantal waterbeheerders onder eigen beheer uitgevoerd.

Uit gesprekken die met circa een twintigtal waterbeheerders zijn gehouden is gebleken dat een deel van deze waterschappen de personeelskosten van eigen personeel dat zich bezighoudt met het op conventionele wijze peilen vaak onterecht niet als kosten ziet. Een kostenvergelijking van (uit te besteden) radaronderzoek met conventioneel onderzoek gaat op deze wijze mank.

Doordat de kosten voor peilen in eigen beheer voornamelijk bekend zijn in aantal manjaren voor het gehele beheergebied is bovendien in het algemeen weinig inzicht in de kosten per km watergang.

Elke waterbeheerder heeft bovendien een eigen kostenstructuur, waardoor algemene uitspraken met betrekking tot de kosten van een conventioneel onderzoek alleen met de nodige voorzichtigheid gedaan kunnen worden. Aan de hand van de gesprekken met de waterbeheerders is een indicatieve schatting gemaakt van de kosten voor conventioneel peilen onder eigen beheer: Hierbij is uitgekomen op een bedrag van circa f 1.500,- à f 2.200,- per km voor het uitvoeren en verwerken van metingen en het invoeren in het interne (gis)systeem (uitgaande van sloten van voornamelijk 5 tot 15 m breed).

Momenteel bedragen de kosten van een georadaronderzoek in een goed toegankelijke sloot (van circa 5 tot 15 m breed) inclusief verwerken van de data en digitaal leveren van de gegevens in het juiste 'format' voor invoer in het (gis)systeem van de waterbeheerder voor f 1.100,- à f 1.600,- per km. Deze indicatieve prijs hangt natuurlijk af van de toegankelijkheid (bevaarbaarheid) van de watergang en de gewenste oplevering/rapportage.

Een peiling, slibdiktemeting of baggerspeciehoeveelheidsbepaling met behulp van georadar levert een resultaat dat gebaseerd is veel meer meetwaarden (honderden tot duizenden maal het aantal dat bij conventioneel onderzoek gebruikelijk is). Met georadar kan daarom een veel gedetailleerder beeld worden verkregen van de toestand van een watergang dan tot nu toe gebruikelijk is.

Bovendien levert de toegepaste meetprocedure digitale gegevens op die gekoppeld zijn aan het Rijksdriehoek-stelsel. Het opnemen van de resultaten in een geautomatiseerd gegevensbestand is daarom eenvoudig te realiseren.

De meerprijs voor het met georadar bepalen van baggerspeciehoeveelheden ten opzichte van waterdieptemetingen hangt in sterke mate af van de complexiteit van het voorkeurprofiel van de te onderzoeken watergang en de vorm waarin deze beschikbaar is.

Als al radarmetingen zijn uitgevoerd ten behoeve van het bepalen van de waterdiepte hoeft voor deze toepassing geen extra veldwerk te worden uitgevoerd.

Bij een toenemende breedte van de watergang wordt radaronderzoek ten opzichte van conventioneel onderzoek per km watergang steeds goedkoper, doordat de veldprocedure effectiever kan worden uitgevoerd.

Bij sloten met een breedte van minder dan 3 à 6 m wordt het omslagpunt bereikt waarop het praktischer en goedkoper wordt om conventioneel onderzoek uit te voeren.

11. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het uitgevoerde onderzoek heeft aanleiding gegeven tot een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek:

- De overgang van water via slib naar vaste waterbodem is niet discreet maar kent een aantal min of meer geleidelijke overgangen. Momenteel is niet bekend hoe een radarsignaal exact reageert op een dergelijke geleidelijke overgangen. Een detailonderzoek naar de opbouw en de fysische eigenschappen van deze geleidelijke overgangen kan hier meer helderheid in brengen.
- Bij de waterbeheerders is een behoefte om de slibdikte onder het leggerprofiel vast te stellen. Dit betekent dat de slibdikte direct uit de radardata dient te worden afgeleid. Deze directe detectie is op het moment niet altijd mogelijk. Nader onderzoek naar randvoorwaarden waarbij, en omstandigheden waaronder directe detectie van de sliblaag wel/niet mogelijk is kan meer inzicht in de mogelijkheden en beperkingen van deze toepassing geven.

12. Verklarende Woordenlijst

Baggerspecie: Het waterbodemmateriaal dat uit een watergang verwijderd moet worden zodat het ideale profiel (leggerprofiel) wordt bereikt.

Diëlektrische constante: Grootte die aangeeft in welke mate ladingen in een medium kunnen worden gescheiden.

Multisampler: Een soort zuigerboor van doorzichtig kunststof waarmee een kern van slap bodemmateriaal kan worden verzameld tot circa 1 à 1,5 m diepte.

RTK-DGPS: Real time kinematic differential global positioning system: een Satellietnavigatiesysteem dat geschikt is om tijdens het varen een positie te bepalen

Slib: Zeer fijnkorrelige afzetting, zoals die vaak op de bodem van een watergang wordt afgezet.

‘Stekkerdoos water’: De ‘Stekkerdoos water’ maakt alle voorkomende vormen van interne en externe uitwisseling van digitale gegevens in de sector water mogelijk gebaseerd op de Adventus gegevensstandaard (GW96).


Veenboor: Een monsternameapparaat waarmee tot een diepte van circa 2 m een ongeroerd monster kan worden verzameld van circa 0,5 m lengte.

Bijlage 1

Waterbodemonderzoek Weezebeek te Almelo

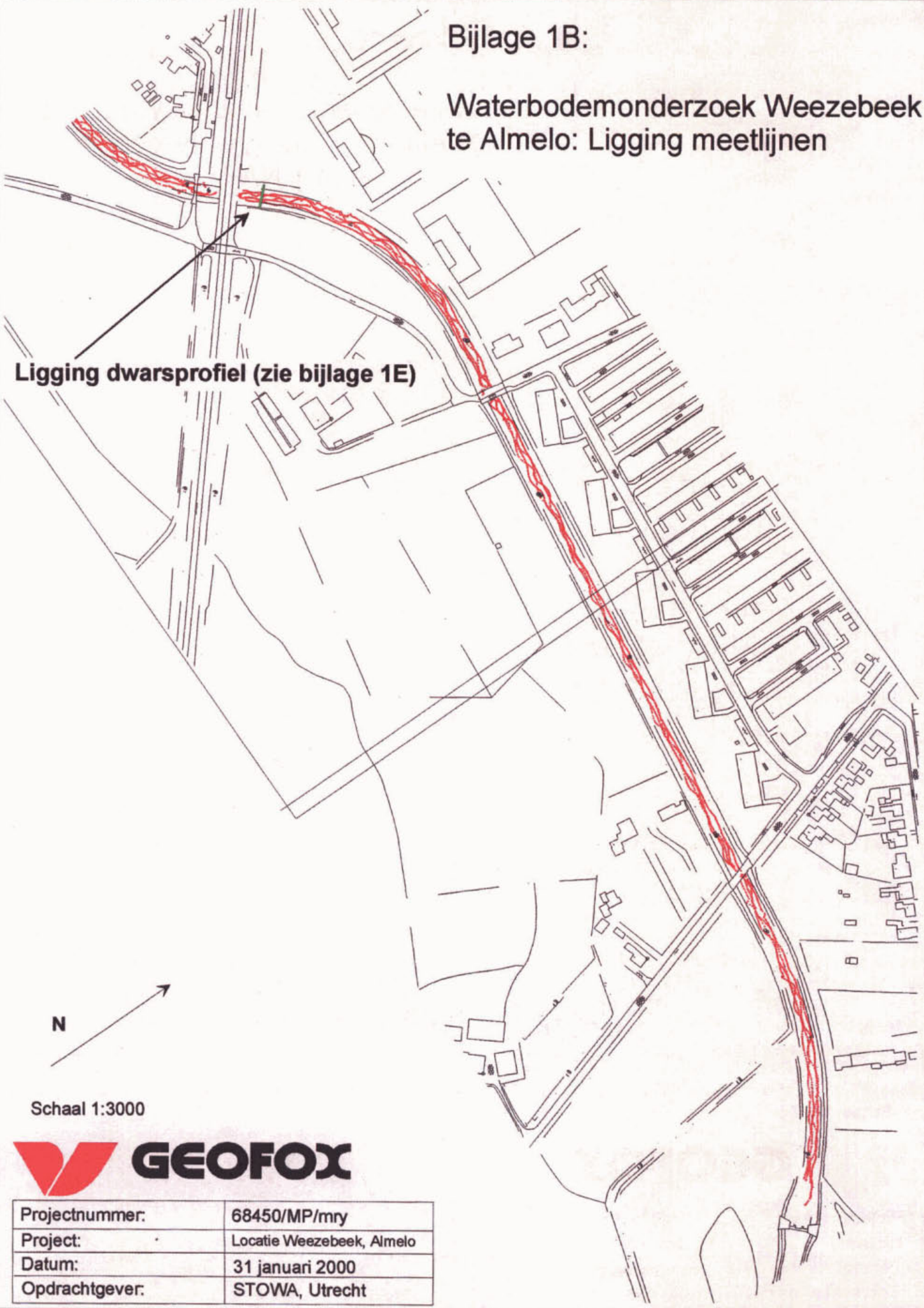


1:25000

ligging onderzochte locatie		Project : Weezebeek Almelo		Projectnr. : 68450/MP		Bijlage : 1A	
Getekend : JvE		Kaartblad : 28G		X - Coord. : 242.000		Datum : 09-02-00 Gew :	
Gecontroleerd : <i>MP</i>		Opdrachtgever : STOWA, Utrecht		Y - Coord. : 484.400			

Bijlage 1B:

Waterbodemonderzoek Weezebeek te Almelo: Ligging meetlijnen



Ligging dwarsprofiel (zie bijlage 1E)

N

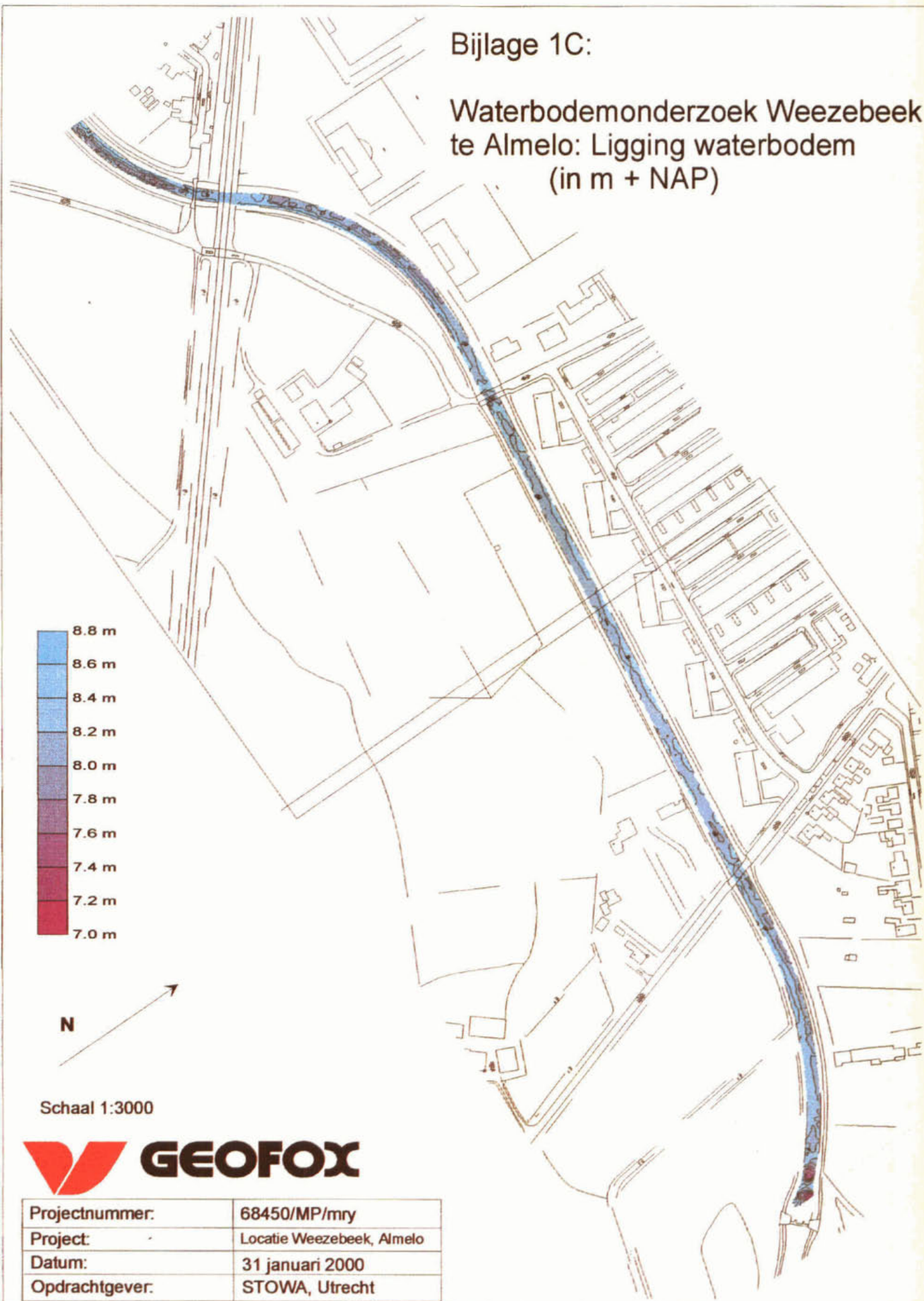
Schaal 1:3000



Projectnummer:	68450/MP/mry
Project:	Locatie Weezebeek, Almelo
Datum:	31 januari 2000
Opdrachtgever:	STOWA, Utrecht

Bijlage 1C:

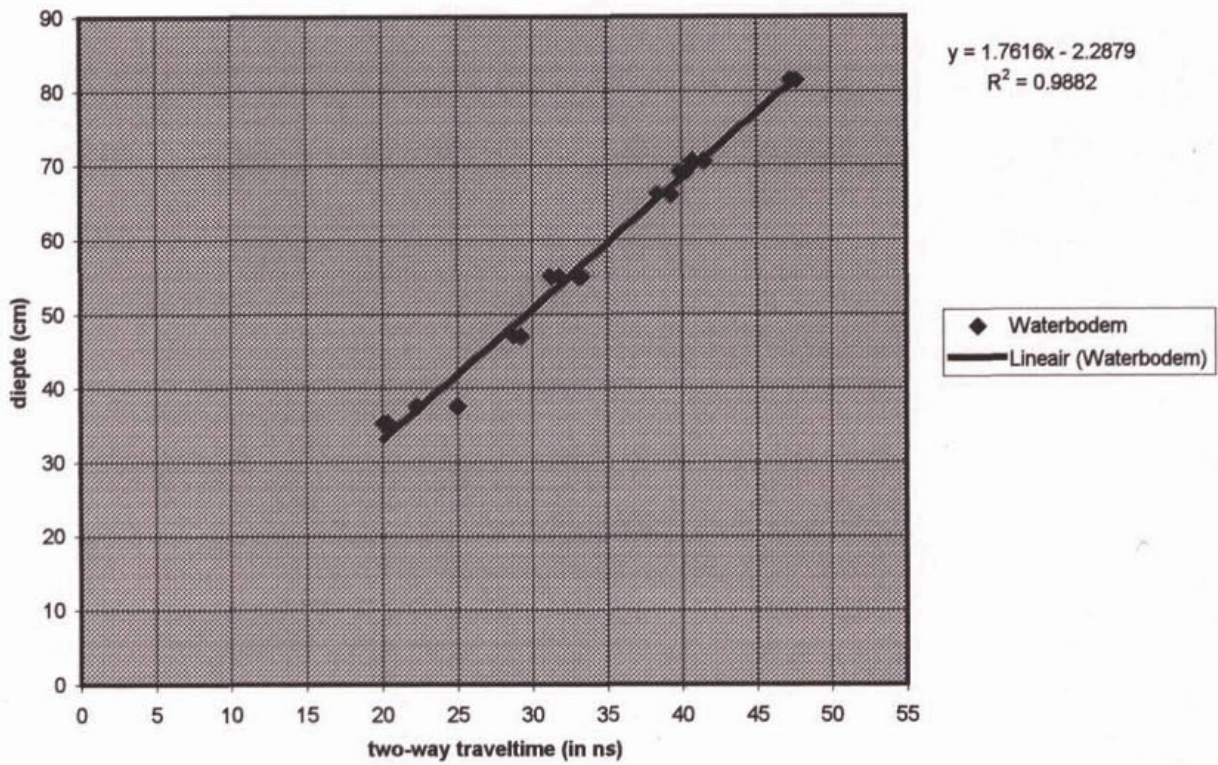
Waterbodemonderzoek Weezebeek te Almelo: Ligging waterbodem (in m + NAP)



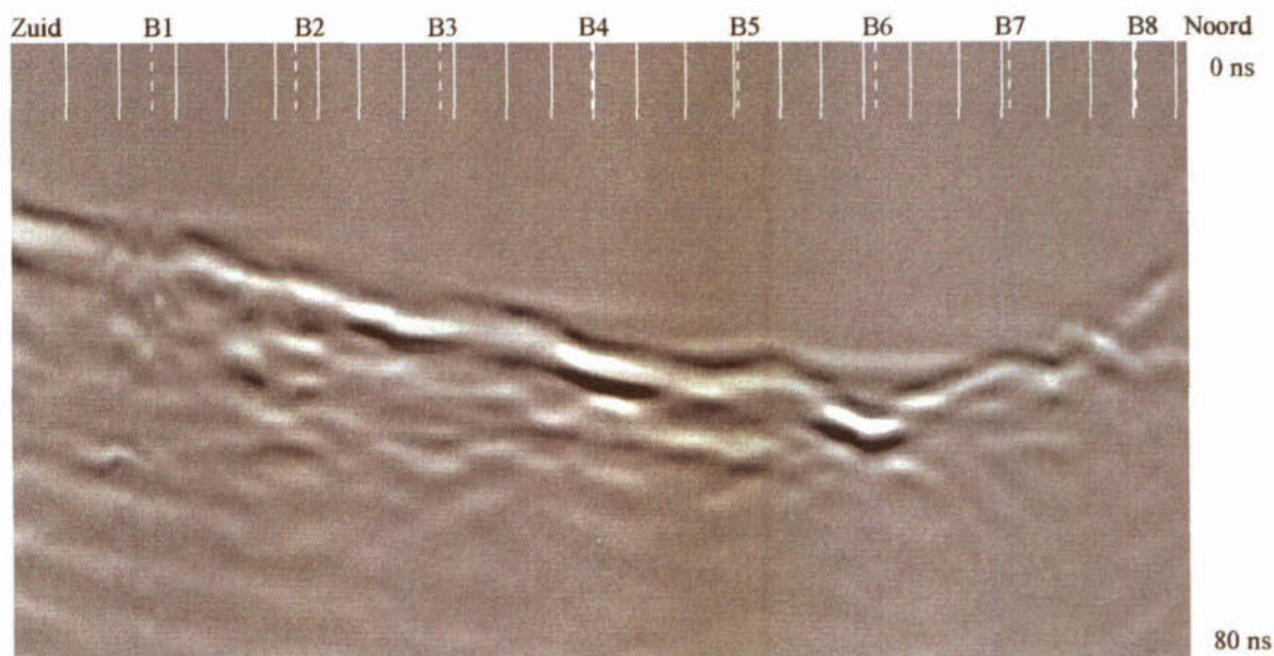
Projectnummer:	68450/MP/mry
Project:	Locatie Weezebeek, Almelo
Datum:	31 januari 2000
Opdrachtgever:	STOWA, Utrecht

Bijlage 1 D

Diepteijking radarmetingen Weezebeek, Almelo



Bijlage 1E: Een dwarsprofiel door de Weezebeek (voor ligging profiel, zie bijlage 1B)



Boorbeschrijvingen multisampler (in cm):

<p>B1 0 - 5 Slib 5 - 33 Zand 33 - 39 Klei 39 - ? Grof zand + grind</p>	<p>B6 0 - 4 Slib 4 - 20 Matig fijn tot matig grof zand + slib 20 - 55 Matig fijn zand 55 - >90 Matig fijn tot matig grof zand</p>
<p>B2 0 - 5 Slib 5 - 15 Grof zand / Fijn zand 15 - 30 Grof zand 30 - 35 Klei 35 - ? Grof zand</p>	<p>B7 0 - 20 Slap slib + grof zand 20 - >60 Zeer fijn zand</p>
<p>B3 0 - 3 Slib 3 - 13 Grof zand 13 - 33 Zeer fijn zand / slib 33 - 45 Fijn zand 45 - >50 Grof zand</p>	<p>B8 0 - 5 Slib 5 - 20 Fijn zand 20 - >40 Zeer fijn zand</p>
<p>B4 0 - 5 Slib 5 - 19 Slap zand / slib 19 - 35 Zeer fijn zand / slib 35 - >70 Grof zand met kiezels</p>	
<p>B5 0 - 7 Slib 7 - 32 Fijn zand 32 - >67 Grof zand</p>	

Bijlage 2

Waterbodemonderzoek Mauriksewetering te Maurik

Bijlage 2A: Ligging onderzochte lokatie



Opdrachtgever: STOWA		mutatiedatum	
1		4	
2		5	
3		6	

Projectnummer: 990030		Projectnaam: Maurikse Wetering	
--------------------------	--	-----------------------------------	--

schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:
1:25000	15/09/99	M.G.	A-3	

LIGGING ONDERZOCHE LOKATIE MAURIKSE WETERING

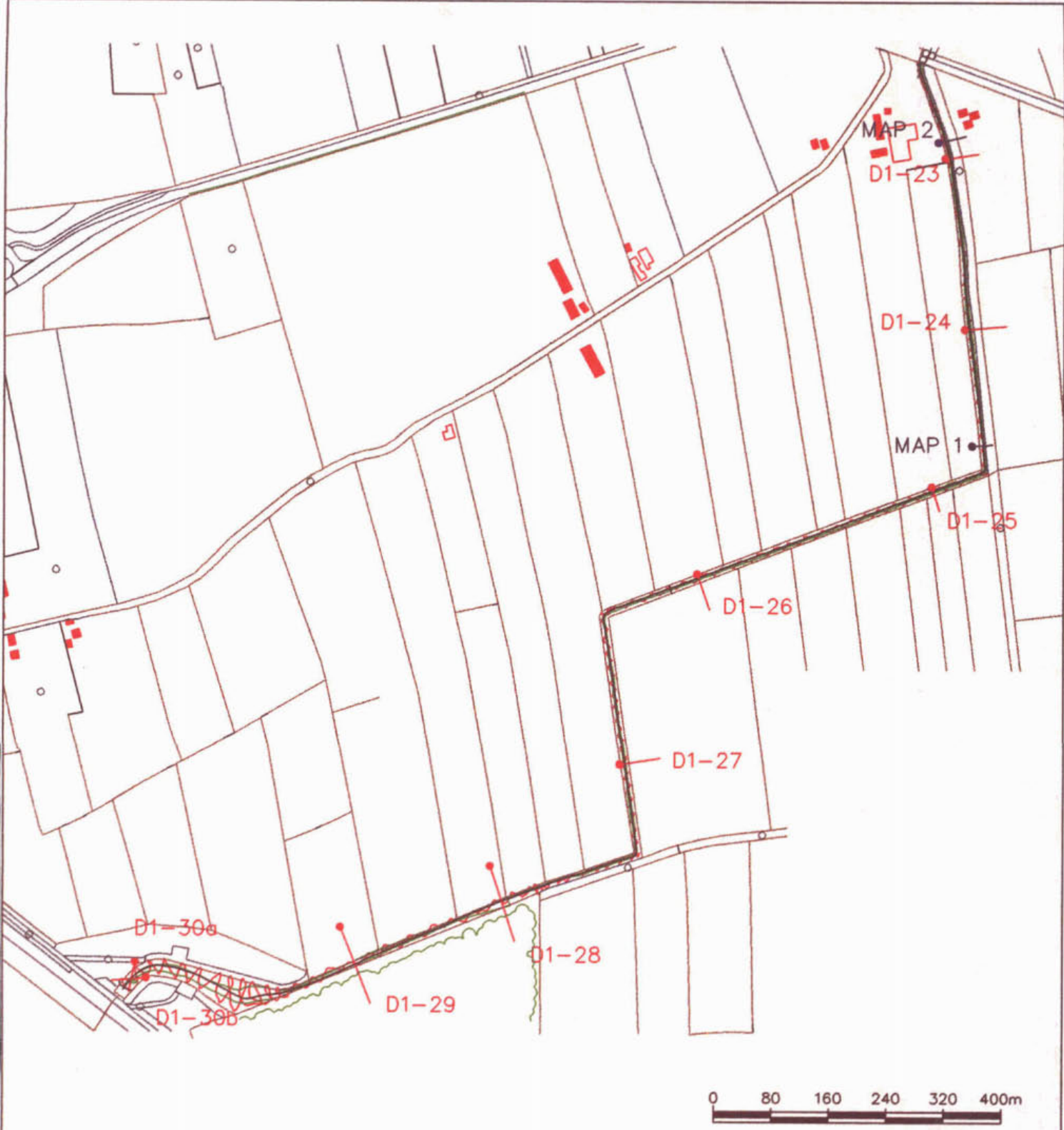






MAP
MAP BENELUX B.V.
Postbus 901
7301 BD Apeldoorn

Tel: +31 065-5346500
Fax: +31 065-5346507



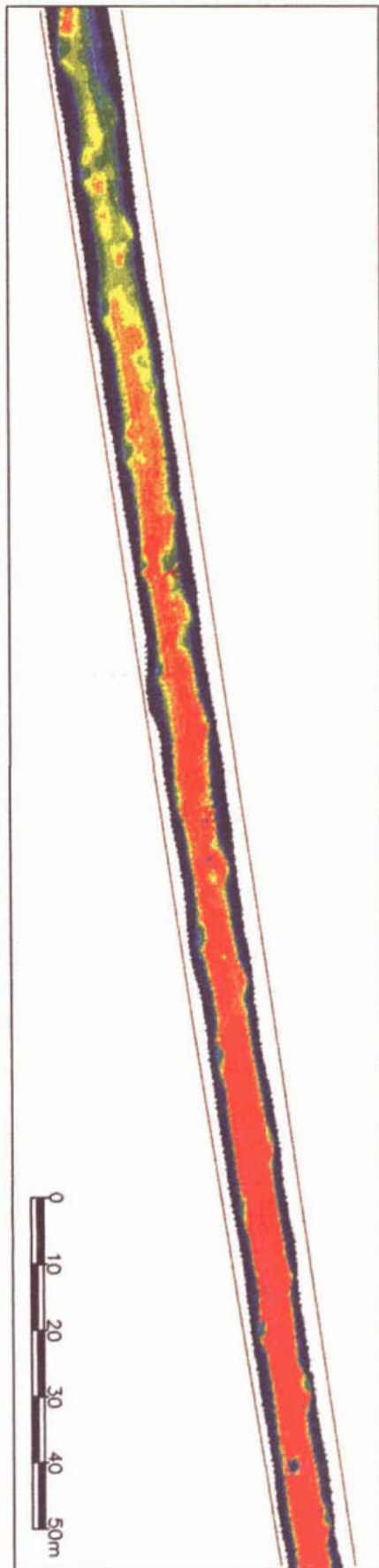
Bijlage 2B: Overzicht vaarlijnen en profielen



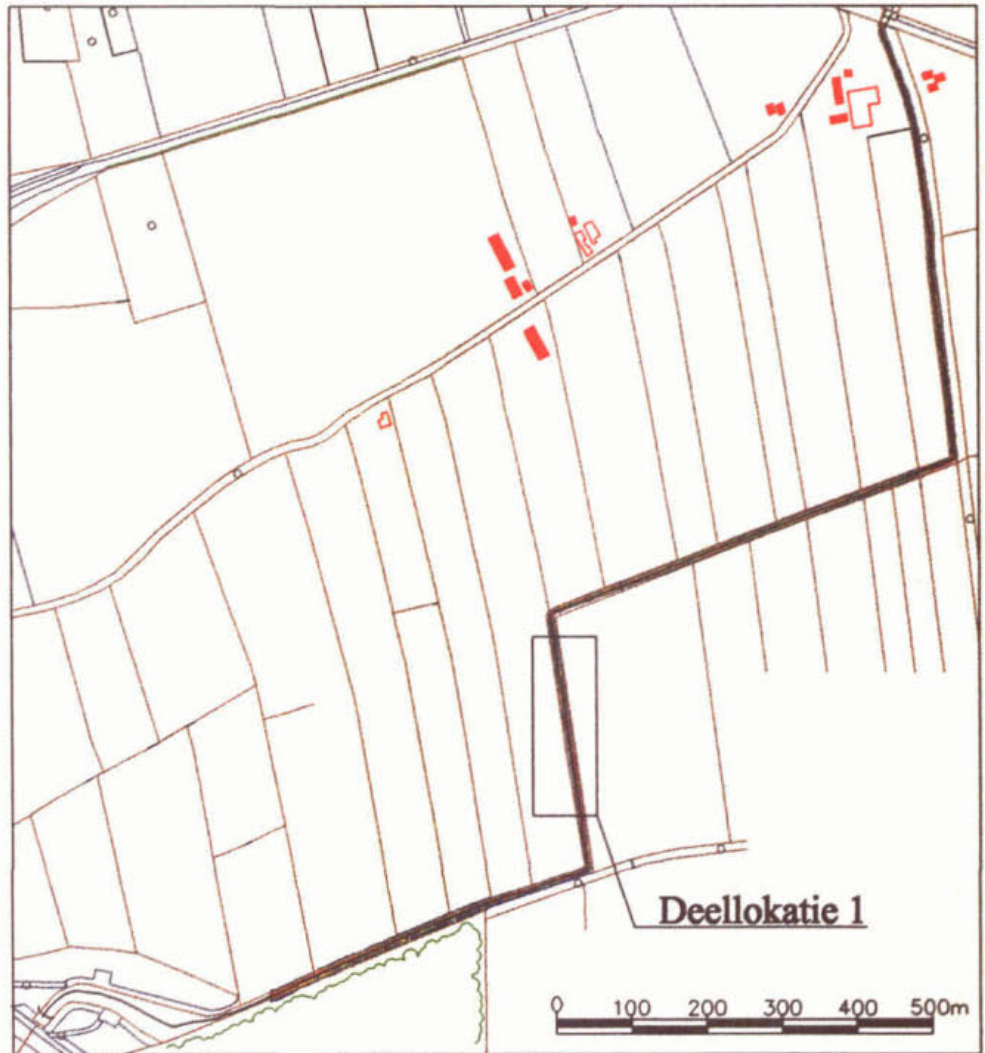
Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
				1	4
				2	5
				3	6
Bron ondergrond: Arcadis Heidemij Advies BV					
Projectnummer: 990030			Projectnaam: Maurikse Wetering		
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
1: 7500	15/09/99	M.G.	A-4	OVERZICHT VAARLIJNEN EN DWARSPROFIELN VOOR DIEPTEMETING MAURIKSE WETERING	
 MAP BENELUX B.V. Postbus 901 7301 BD Apeldoorn Bezoekadres: Laan van Westenenk 501, Apeldoorn				 Randomsurvey lijnen	
				 D1-27 Dwarsprofiel PD Betuwe	

Bijlage 2C: Detailopname dieptemeting

Deellokatie 1 (1:1000)



Lokatie overzicht (1:10.000)



1,9 1,8 1,7 1,6 1,5 1,4 1,3 1,2 1,1 1,0 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3
Bovenkant waterbodern in m +NAP

Opdrachtgever:
STOWA

mutatiedatum

1	4
2	5
3	6

Bron ondergrond: Arcadis Heidemij Advies BV

Projectnummer:
990030

Projectnaam:
Maurikse Wetering

schaal	opnamedatum	get.	formaat
var.	15/09/99	M.G.	A-4

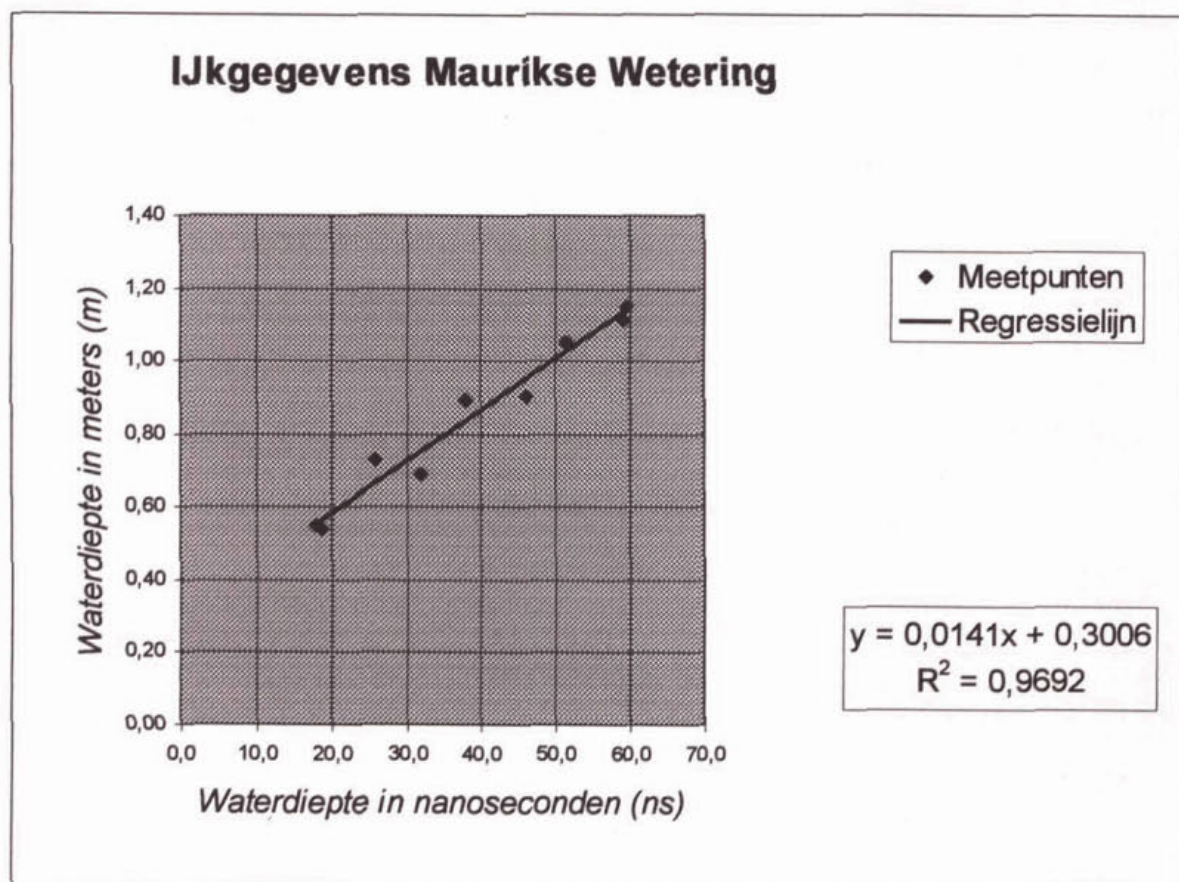
omschrijving:
DETAILOPNAME VAN DIEPTEMETING
MAURIKSE WETERING



MAP BENELUX B.V.
Postbus 901
7301 BD Apeldoorn
Bezoekadres: Leen van Westenenk 501, Apeldoorn
Tel: +31 056-5348500
Fax: +31 056-5348507

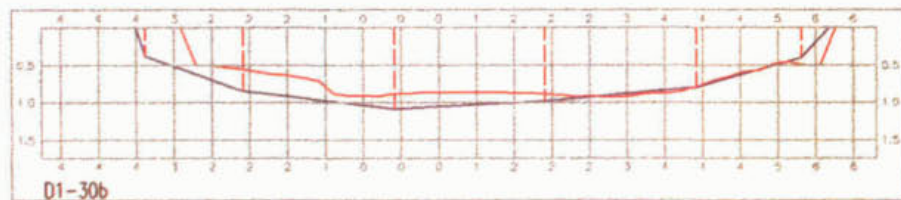
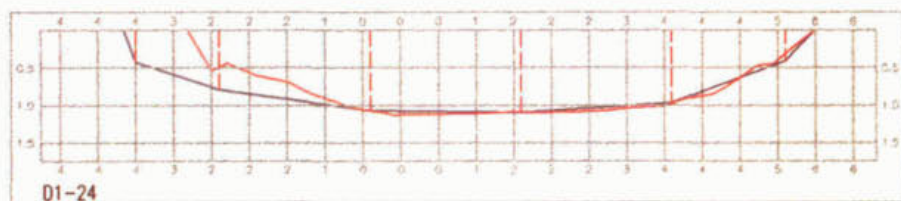
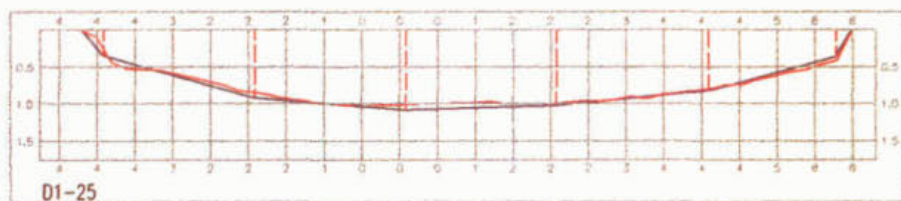
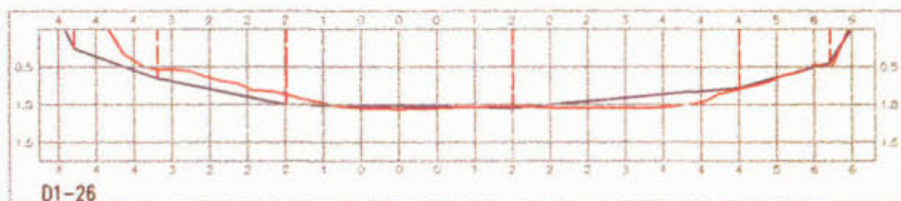
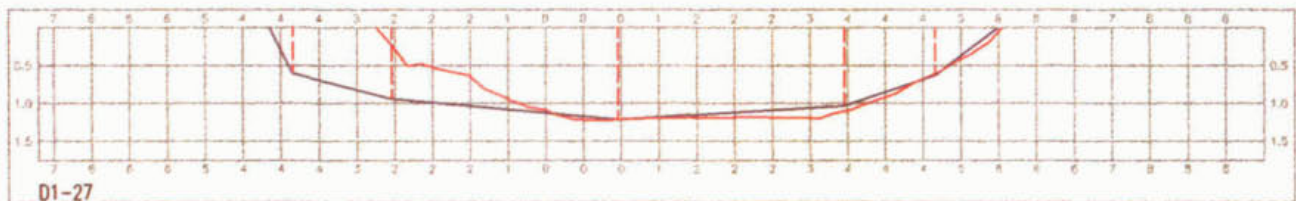
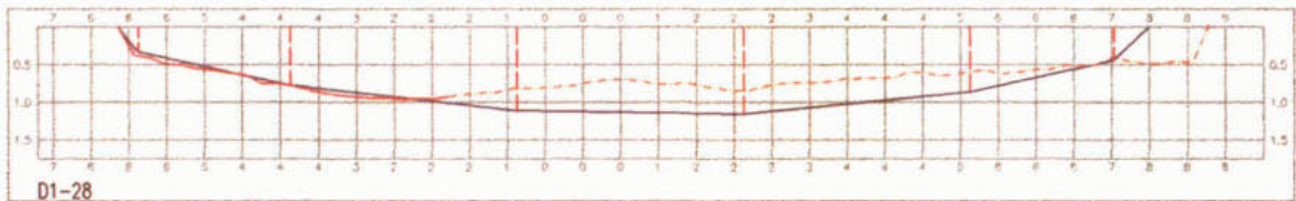
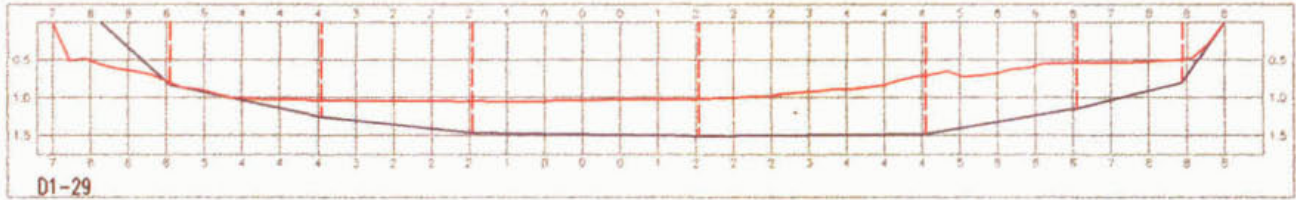
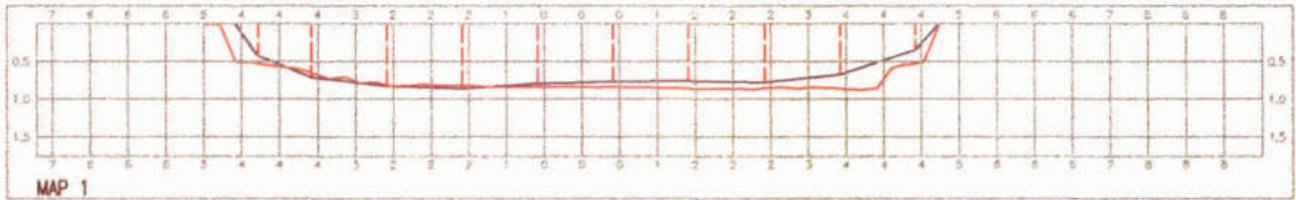
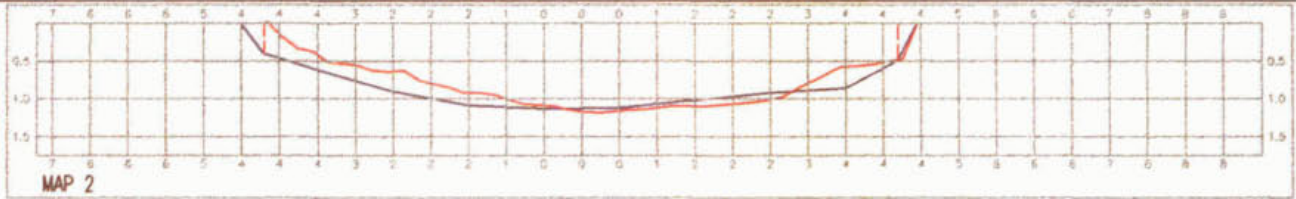


Bijlage 2D: Afijking waterdiepte



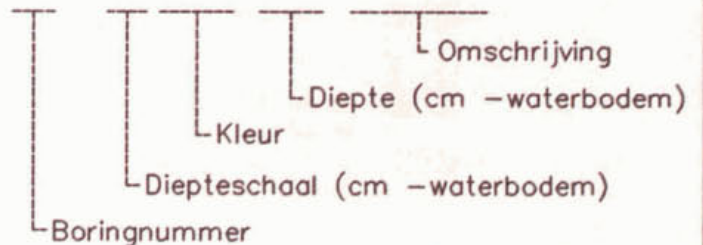
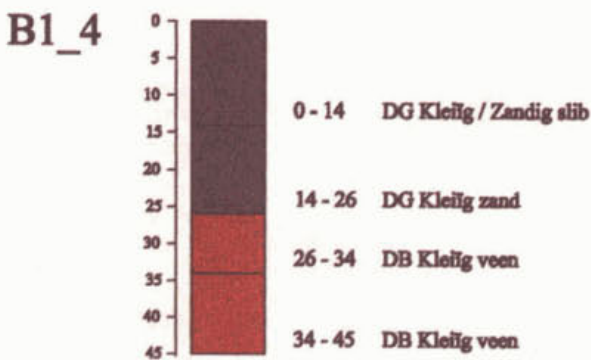
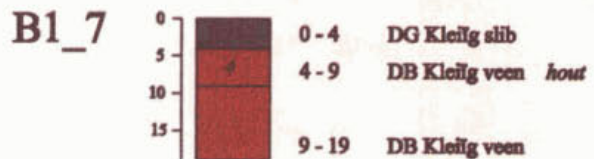
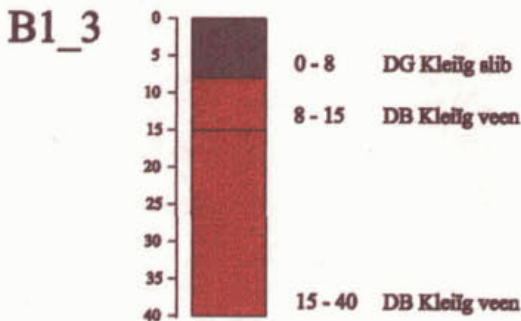
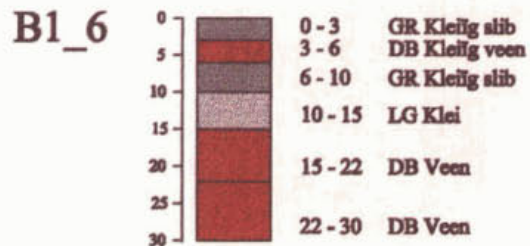
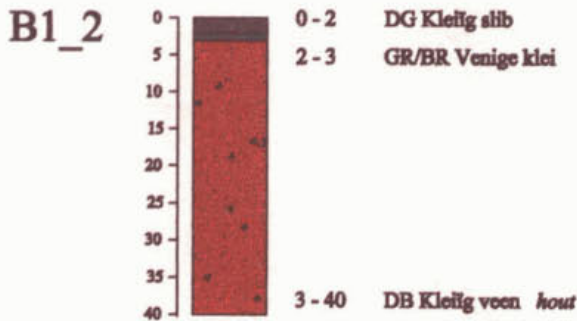
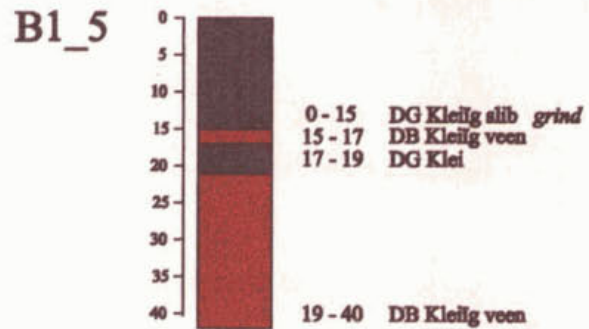
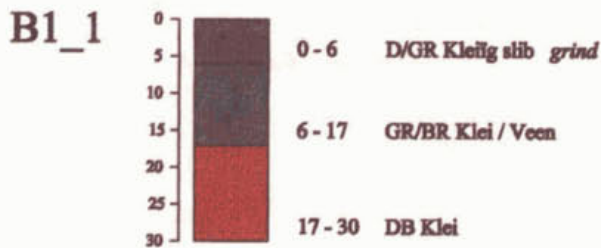
Waterdiepte (peilen) (m)	Waterdiepte (georadar) (ns)	Waterdiepte (berekend) (m)
0,55	18,0	0,55
0,69	32,1	0,75
0,90	46,2	0,95
1,11	59,1	1,13
1,15	59,6	1,14
1,15	59,5	1,14
1,05	51,5	1,03
0,89	37,9	0,83
0,73	25,9	0,67
0,54	18,7	0,56


Bijlage 2E: Overzicht profielen georadar en conventioneel



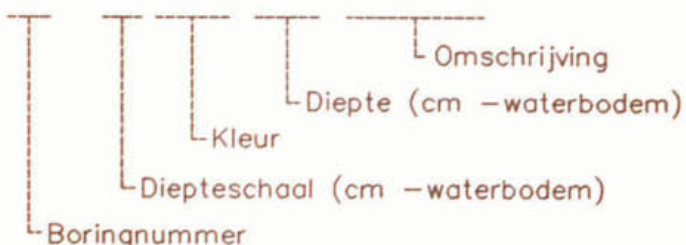
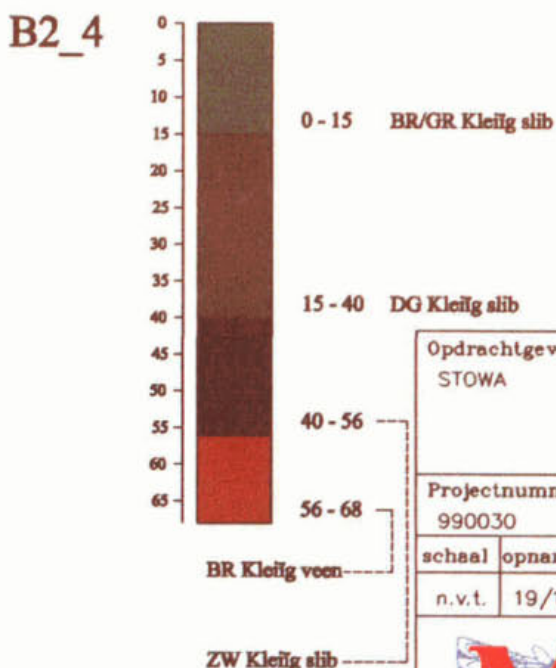
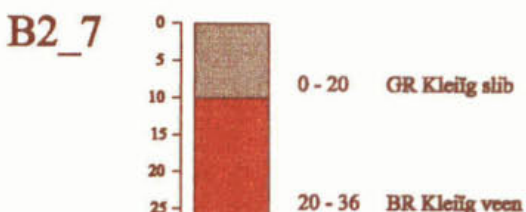
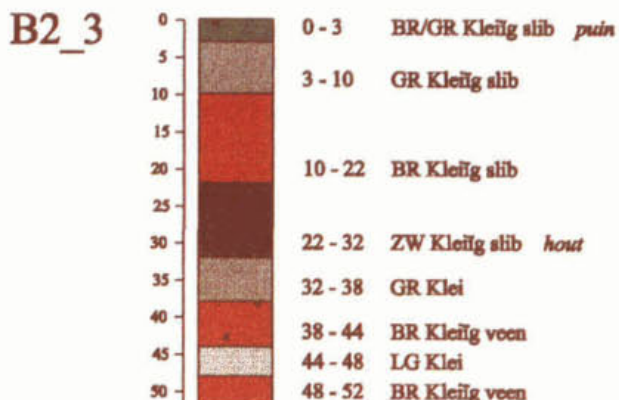
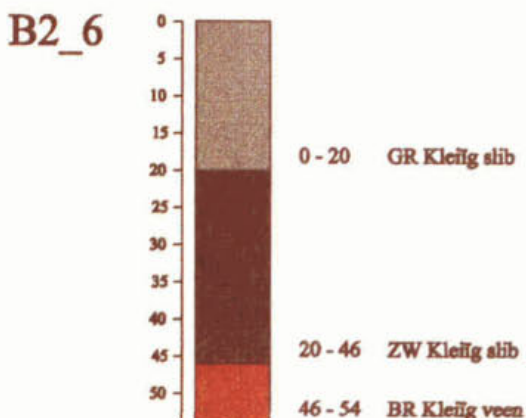
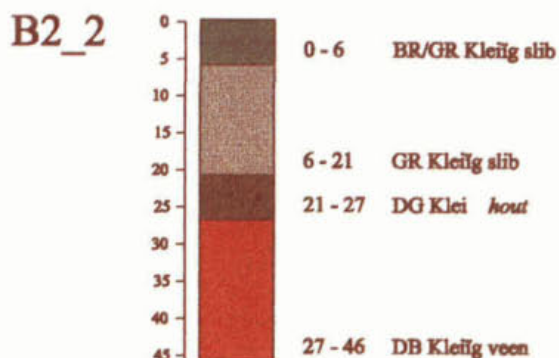
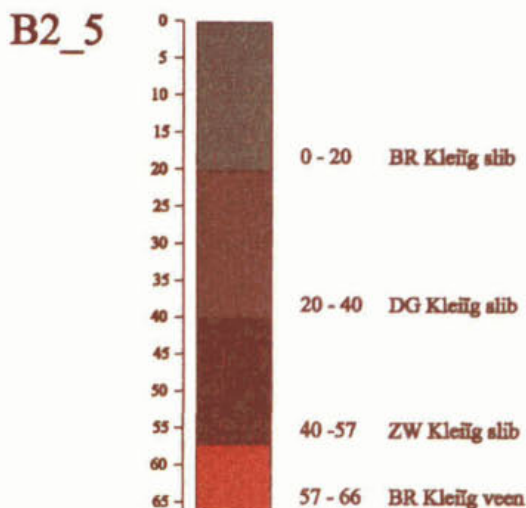
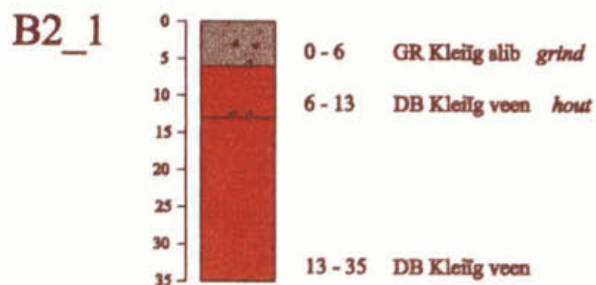
Opdrachtgever: STOWA	mutatiedatum		Projectnaam: Mourikse Wetering		omschrijving: OVERZICHT VERGELIJKING DWARS- PROFIELEN VAN PD BETUWE EN MAP
	1	2	3	4	
Projectnummer: 990030	schaal	opnamedatum	get.	M.G.	— Profielen PD Betuwe — Profielen MAP - - - Peilplek profielen
	1:100	01/09/99			
MAP BENELUX B.V. Postbus 901 7301 BD Apeldoorn Tel: +31 055-5346500 Fax: +31 055-5346500					


Bijlage 2F1: Overzicht boorprofielen



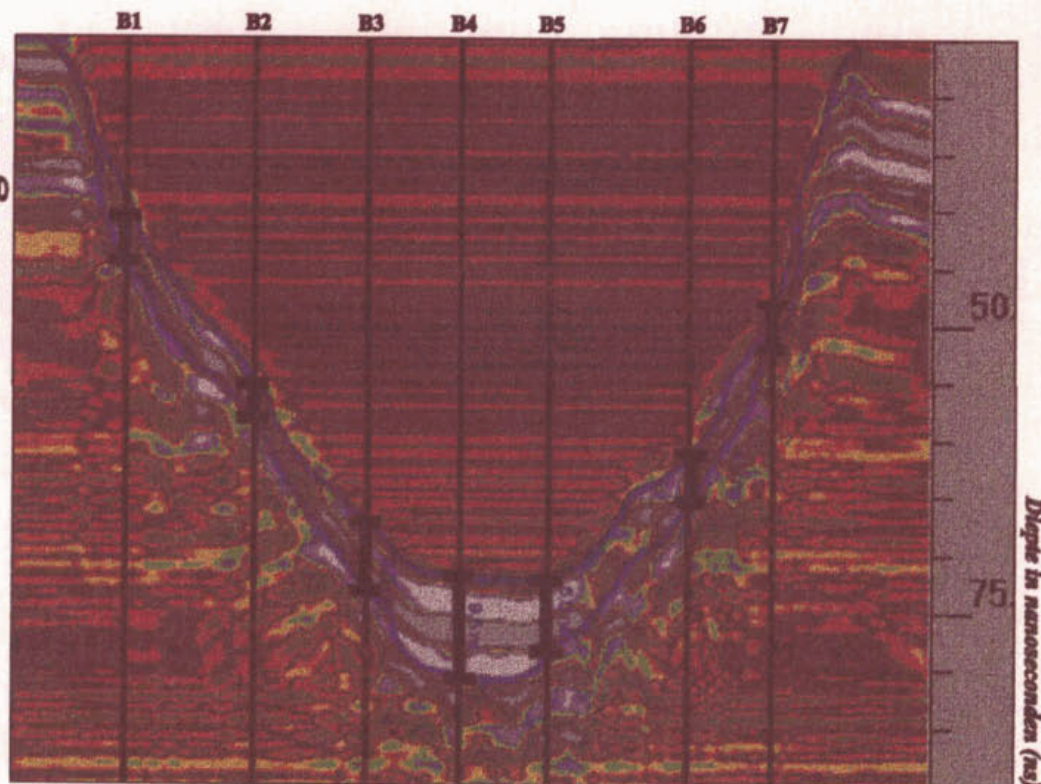
Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
				1	4
				2	5
				3	6
Projectnummer: 990030			Projectnaam: Maurikse Wetering		
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
n.v.t.	19/10/99	M.G.	A-4	OVERZICHT BOORPROFIELEN DWARSPROFIEL 1	
 MAP MAP BENELUX B.V. Postbus 901 7301 BD Apeldoorn Bezoekadres: Laan van westenenk 501, Apeldoorn					
			Tel: +31 055-5346500 Fax: +31 055-5346507		

Bijlage 2F2: Overzicht boorprofielen

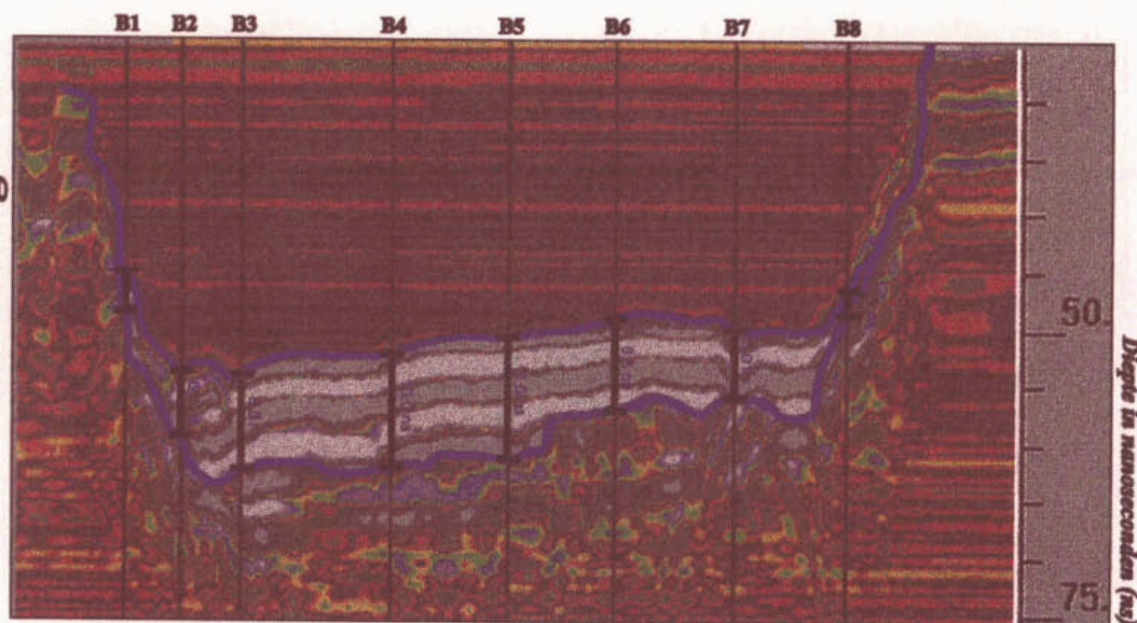


Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
				1	4
				2	5
				3	6
Projectnummer: 990030			Projectnaam: Maurikse Wetering		
schaal	opnamedatum	geL	formaat	omschrijving:	
n.v.t.	19/10/99	M.G.	A-4	OVERZICHT BOORPROFIELEN DWARSPROFIEL 2	
					
MAP BENELUX B.V. Postbus 901 Tel: +31 065-6346500 7301 BD Apeldoorn Fax: +31 065-6346507 Bezoekadres: Leen van westenenk 501, Apeldoorn					

Radargram 1



Radargram 2



Verklaring

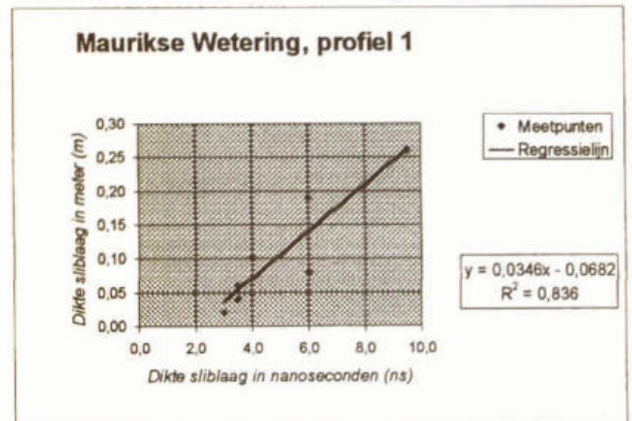
-  Begrenzing sliblaag
- B1**
 Boring met nummer
- 3.0 ns** Dikte sliblaag in ns

Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
				1	4
				2	5
				3	6
Projectnummer: 990030			Projectnaam: Maurikse Wetering		
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
n.v.t.	19/10/99	M.G.	A-4	OVERZICHT IJKINGS RADARGRAMMEN	
					
MAP BENELUX B.V. Postbus 901 7301 BD Apeldoorn					
Tel: +31 055-5346600 Fax: +31 055-5346607					

Bijlage 2H: Afijking slibdiktemeting

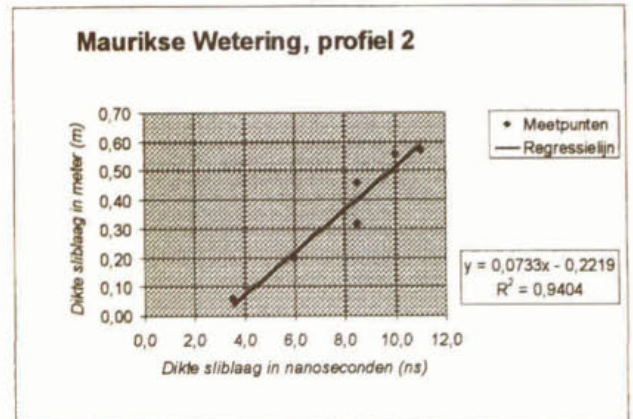
Profiel 1

Boringnr.	Dikte sliblaag		
	Peiling (m)	Georadar (ns)	Berekend (m)
1_1	0,06	3,5	0,04
1_2	0,02	3,0	0,01
1_3	0,08	6,0	0,20
1_4	0,26	9,5	0,43
1_5	0,19	6,0	0,20
1_6	0,10	4,0	0,07
1_7	0,04	3,5	0,04

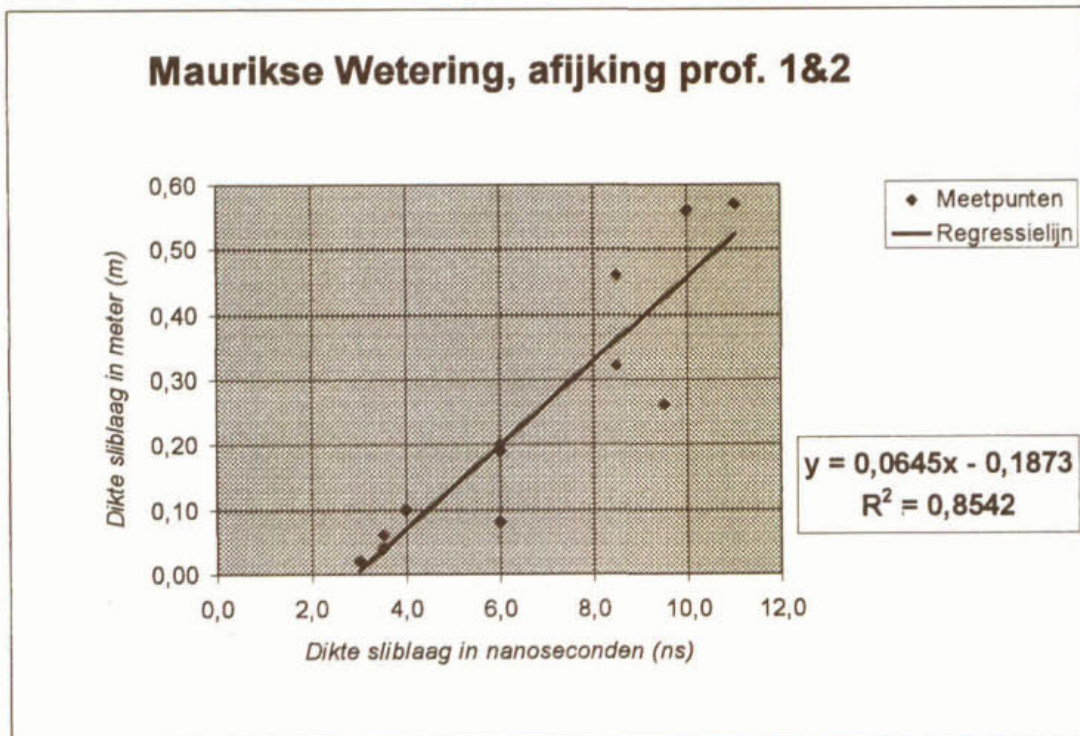


Profiel 2

Boringnr	Dikte sliblaag		
	Peiling (m)	Georadar (ns)	Berekend (m)
2_1	0,06	3,5	0,04
2_2	0,20	6,0	0,20
2_3	0,32	8,5	0,36
2_4	0,56	10,0	0,46
2_5	0,57	11,0	0,52
2_6	0,46	8,5	0,36
2_7	0,20	6,0	0,20



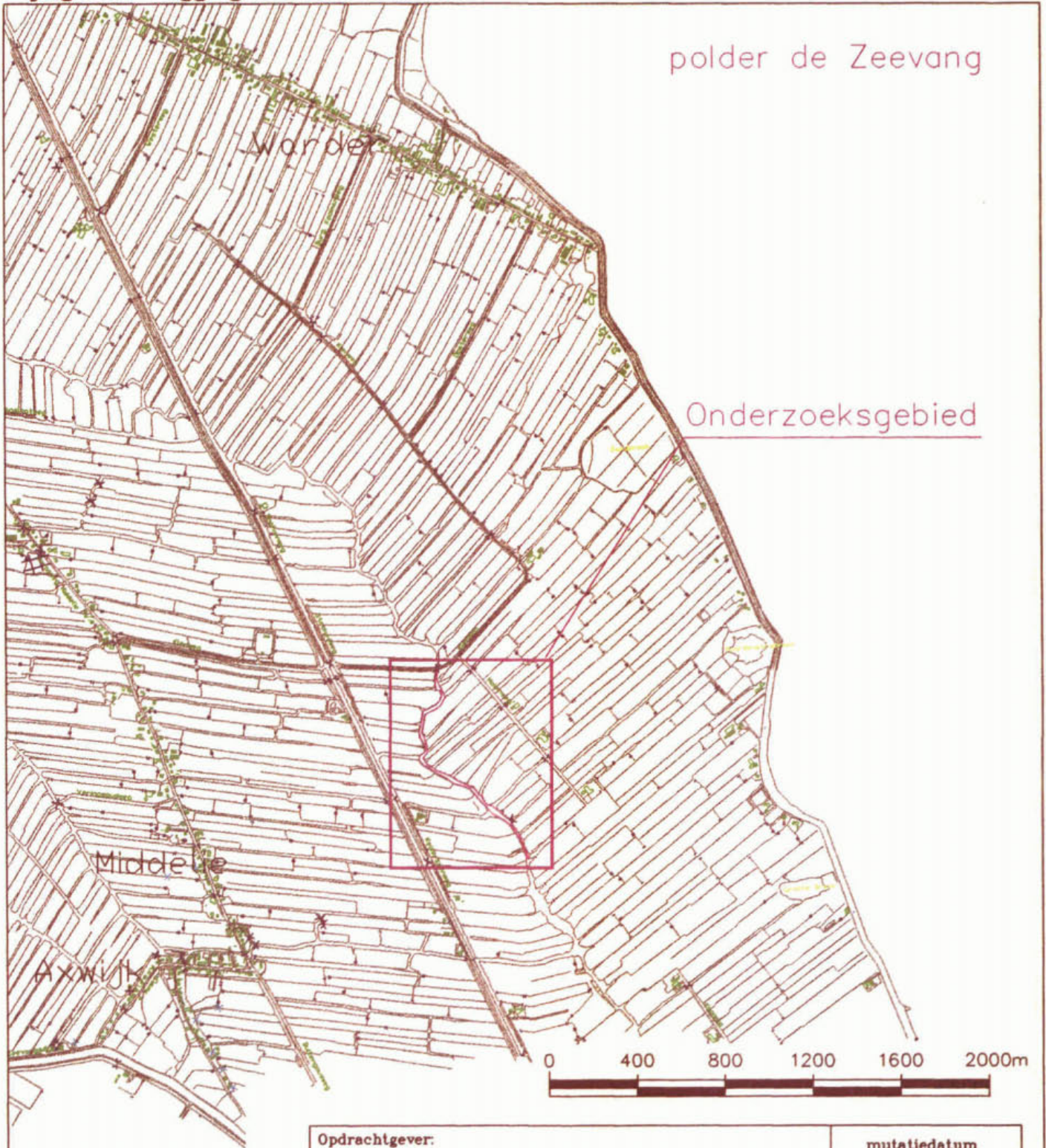
Vastgestelde vergelijking voor omrekenen slibdiktes Maurikse Wetering



Bijlage 3

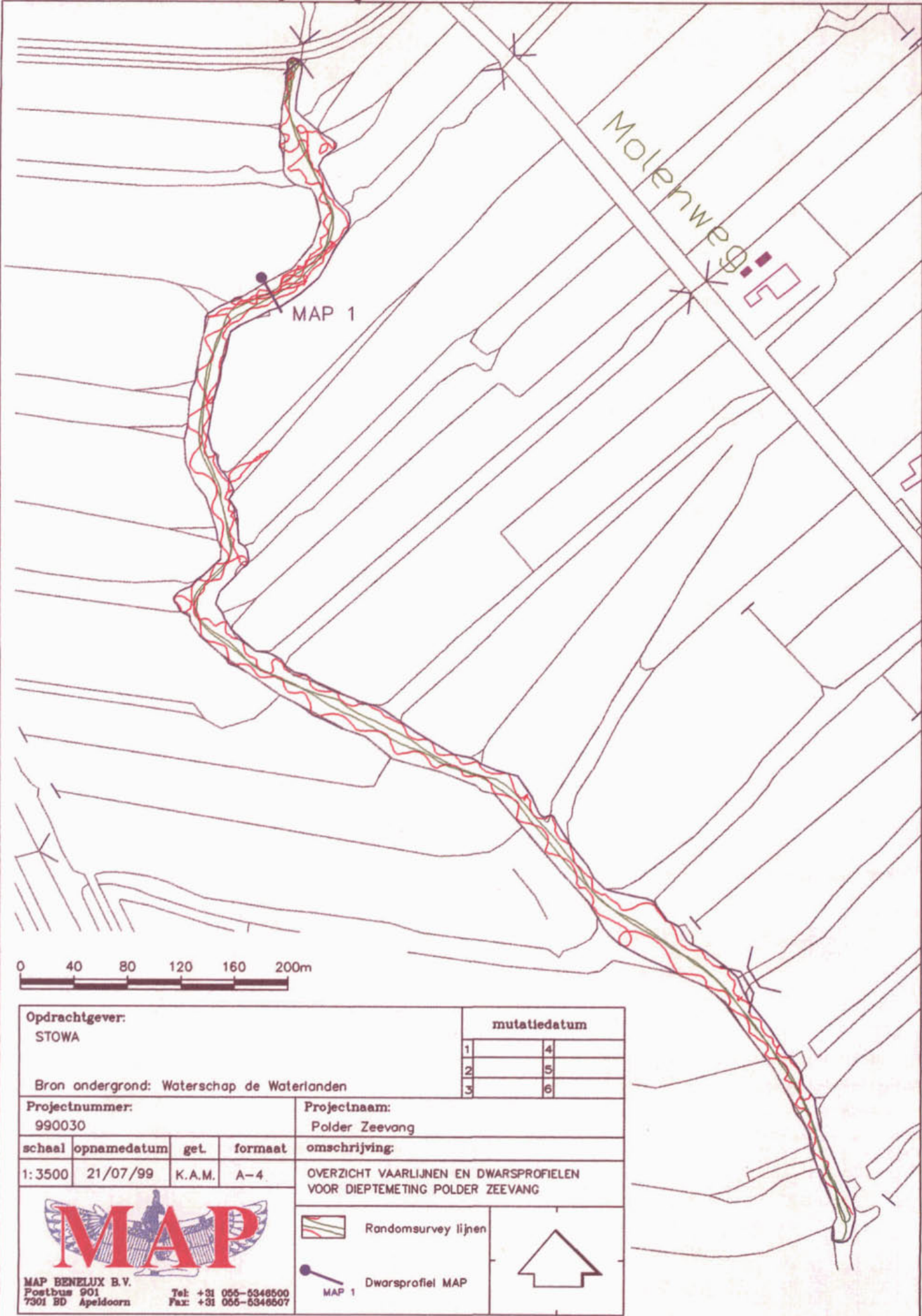
Waterbodemonderzoek Zije nabij Edam (bedrijf A)

Bijlage 3A: Ligging onderzochte lokatie



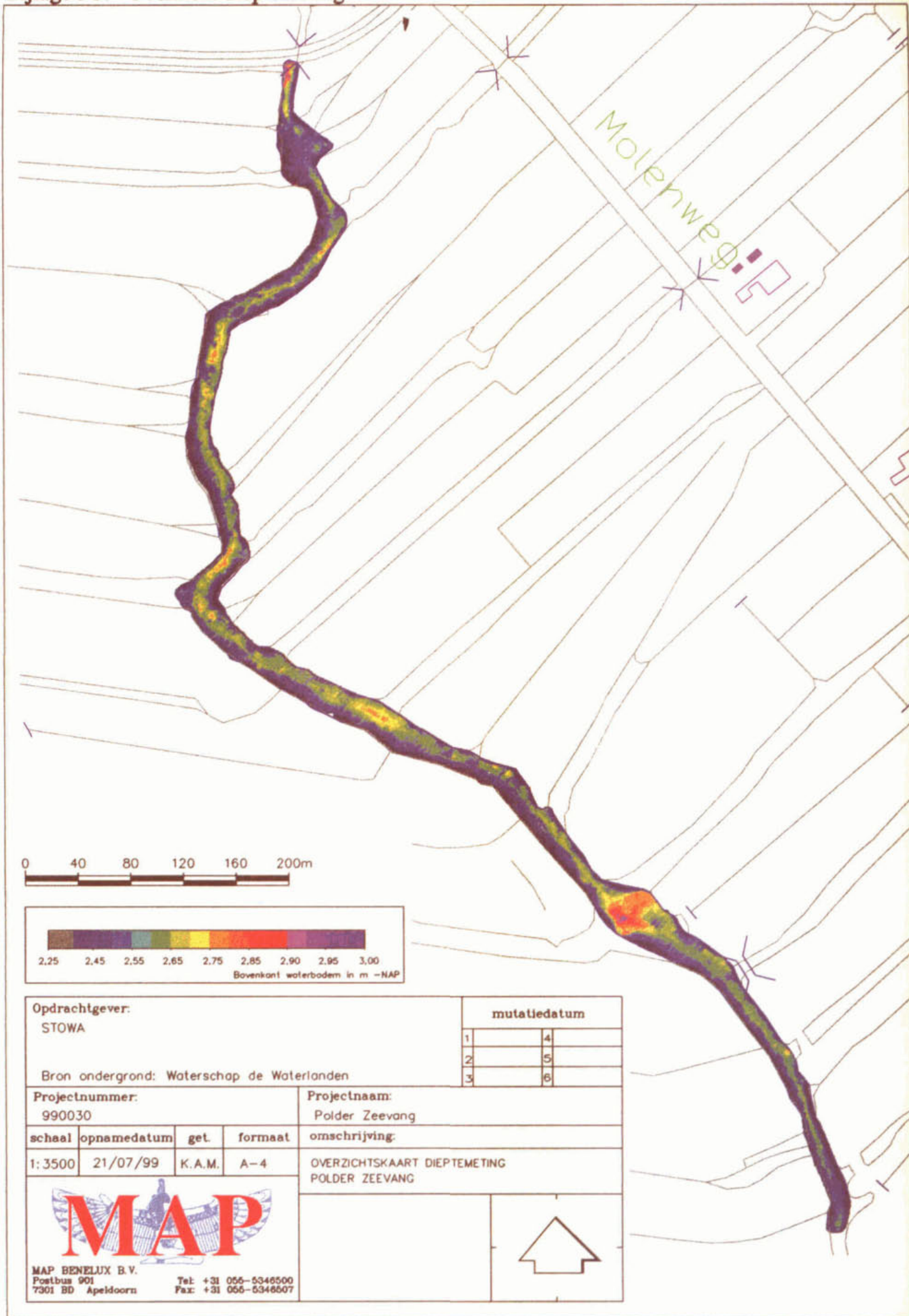
Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
				1	4
				2	5
				3	6
Bron ondergrond: Waterschap de Waterlanden					
Projectnummer: 990030			Projectnaam: Polder Zeevang		
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
1: 25000	21/07/99	M.G.	A-4	LIGGING ONDERZOCHTE LOKATIE POLDER ZEEVANG	
					

Bijlage 3B: Overzicht vaarlijnen en profielen



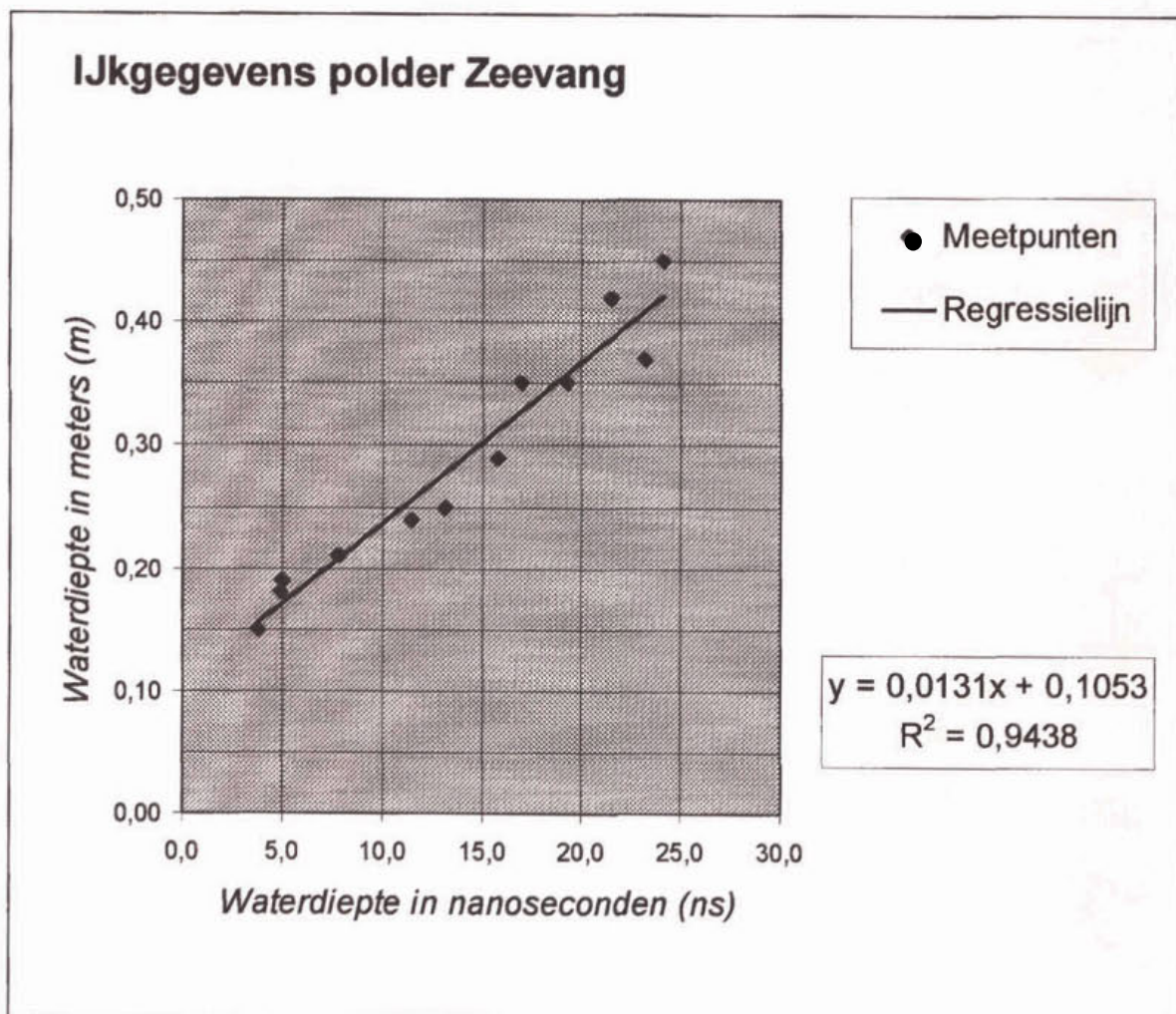
Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
Bron ondergrond: Waterschap de Waterlanden				1	4
Projectnummer: 990030				2	5
Projectnaam: Polder Zeevang				3	6
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
1:3500	21/07/99	K.A.M.	A-4	OVERZICHT VAARLIJNEN EN DWARSPROFIENEN VOOR DIEPTEMETING POLDER ZEEVANG	
 MAP BENELUX B.V. Postbus 901 7301 BD Apeldoorn Tel: +31 055-5348500 Fax: +31 055-5348507				Randomsurvey lijnen	Dwarsprofiel MAP MAP 1

Bijlage 3C: Overzicht dieptemeting



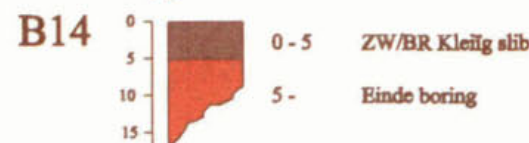
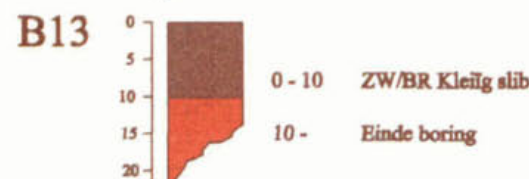
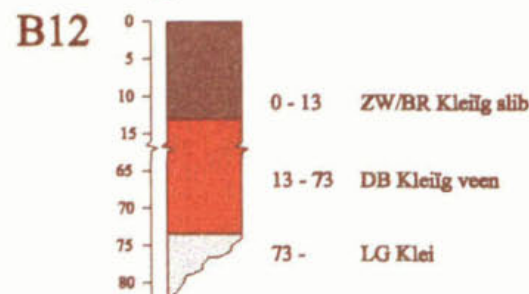
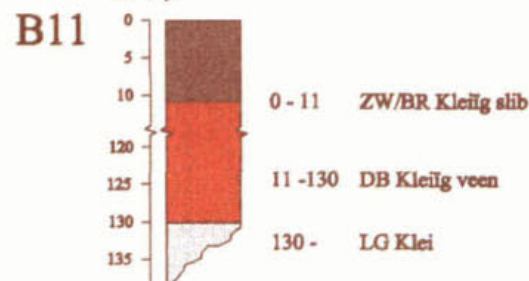
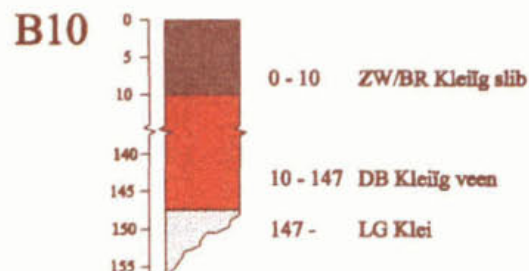
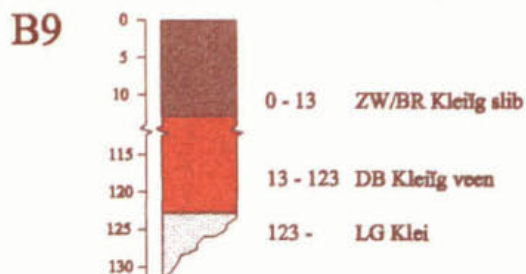
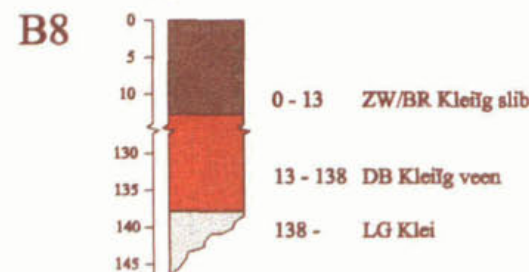
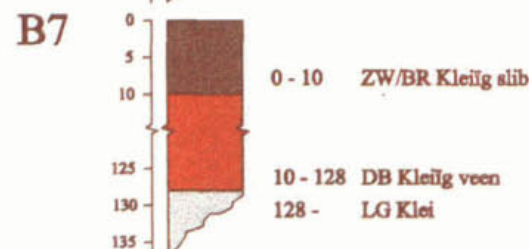
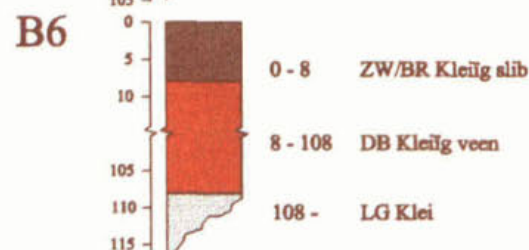
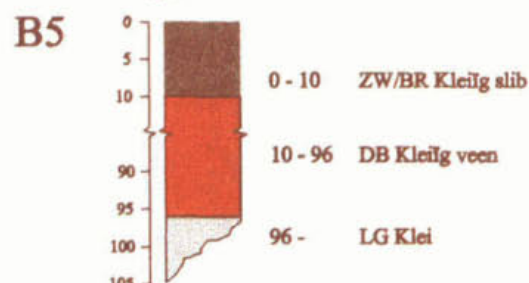
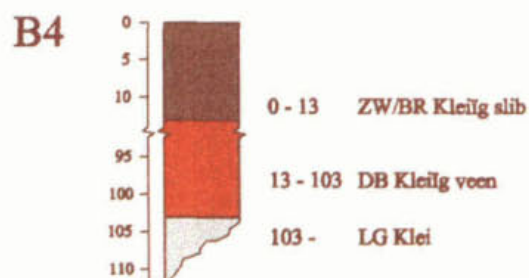
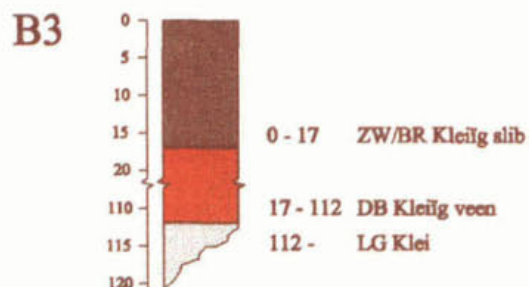
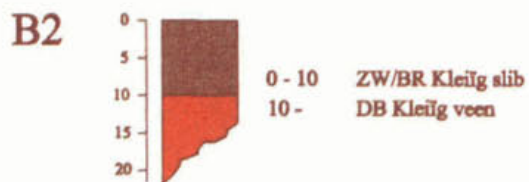
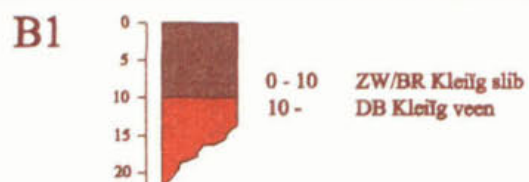
Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
Bron ondergrond: Waterschap de Waterlanden				1	4
Projectnummer: 990030				2	5
Projectnaam: Polder Zeevang				3	6
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
1:3500	21/07/99	K.A.M.	A-4	OVERZICHTSKAART DIEPTEMETING POLDER ZEEVANG	
 MAP BENELUX B.V. Postbus 901 7301 BD Apeldoorn					

Bijlage 3D: Afijking waterdiepte



Waterdiepte (peilen) (m)	Waterdiepte (georadar) (ns)	Waterdiepte (berekend) (m)
0,18	4,9	0,17
0,19	5,0	0,17
0,25	13,2	0,28
0,35	19,3	0,36
0,42	21,5	0,39
0,45	24,1	0,42
0,37	23,2	0,41
0,35	17,0	0,33
0,29	15,8	0,31
0,24	11,5	0,26
0,21	7,8	0,21
0,15	3,8	0,16

Bijlage 3E: Overzicht boorprofielen



Opdrachtgever: STOWA				mutatiedatum	
				1	4
				2	5
				3	6
Projectnummer: 990030			Projectnaam: Palder Zeevang		
schaal	opnamedatum	get.	formaat	omschrijving:	
n.v.t.	19/10/99	M.G.	A-4	OVERZICHT BOORPROFIELEN DWARSPROFIEL MET DIEPTE IN CM - WATERBODEM	
					
MAP BENELUX B.V. Postbus 901 Tel: +31 066-6348600 7301 BD Apeldoorn Fax: +31 066-6348607 Bezoekadres: Leen van Westenenk 501, Apeldoorn					

Bijlage 4

Waterbodemonderzoek Zije nabij Edam (bedrijf B)

Bijlage 4A:

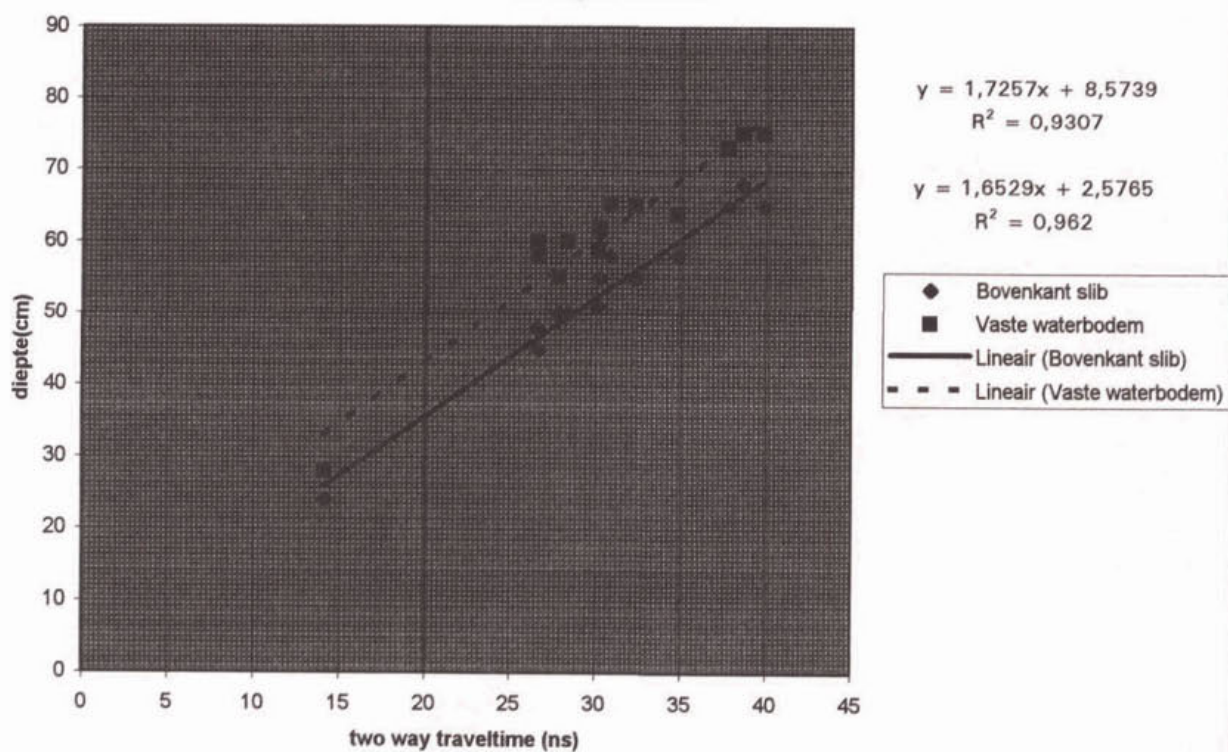
Waterbodemonderzoek de Zije, polder Zeevang Ligging meetlijnen



Projectnummer:	68450/MP/mry
Project:	Locatie Polder Zeevang
Datum:	31 januari 2000
Opdrachtgever:	STOWA, Utrecht

Schaal 1:5000

Diepteijking radarmetingen de Zije, Edam



Bijlage 4C:

Waterbodemonderzoek polder Zeevang Ligging waterbodem (in m - N.A.P.)



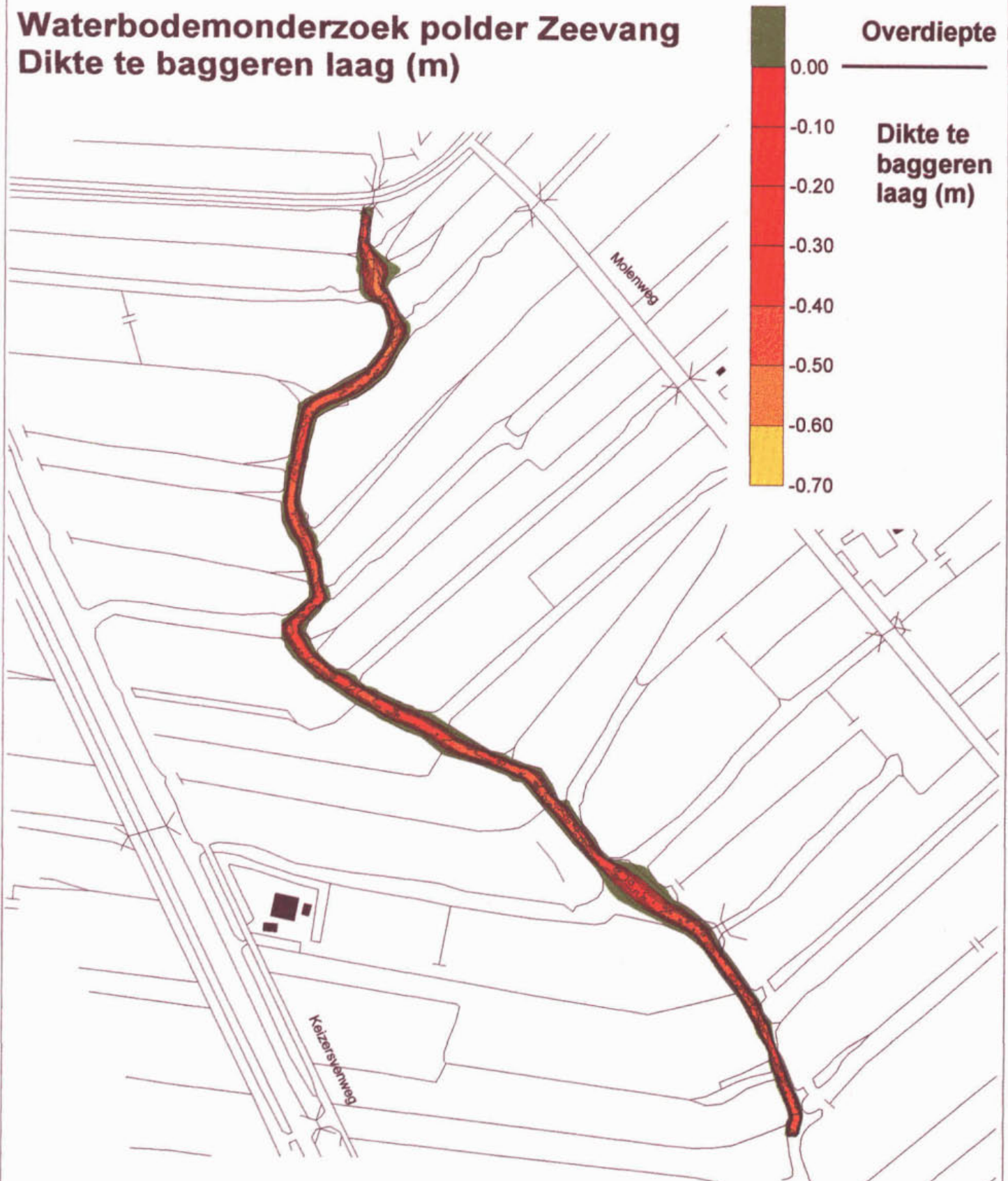
 **GEOFOX**

Projectnummer:	68450/MP/mry
Project:	Locatie Polder Zeevang
Datum:	31 januari 2000
Opdrachtgever:	STOWA, Utrecht

Schaal 1 : 5.000

Bijlage 4D:

Waterbodemonderzoek polder Zeevang Dikte te baggeren laag (m)



Projectnummer:	68450/MP/mry
Project:	Locatie Polder Zeevang
Datum:	31 januari 2000
Opdrachtgever:	STOWA, Utrecht

Schaal 1 : 5.000



