

1 Paleomagnetisme en sondeercurves

1.1 Inleiding

Door Fugro is in 2004 een conustype (magnetometer) ontwikkeld waarmee tijdens sonderingen de veldsterkte van het aardmagnetisch veld in drie haaks op elkaar staande richtingen (X, Y, Z) direct gemeten kan worden. In praktijk worden hiermee afwijkingen in het aardmagnetisch veld gemeten ten behoeve van de opsporing van grote metalen objecten. De afstand tot aan de conus waarbinnen metalen objecten gedetecteerd kunnen worden bedraagt maximaal 4 meter. Hierbij valt te denken aan onontpofte explosieven (UXO, aanwezig tot maximaal 20 meter onder maaiveld), trekankers of de onderzijde van damwandconstructies. Voorafgaand aan de aanleg van de A4 tussen Schiedam en Delft is een serie van dit soort magnetometer sonderingen gezet op die locaties waar UXO werden vermoed. Interpretatie van de metingen door [Breijn](#) gaf echter aan dat, naast het voorkomen van metalen objecten, natuurlijke afwijkingen in het aardmagnetisch veld mogelijk te meten te zijn. Met name ompolingen (Reversals) en grensvlakken blijken in een aantal van deze sonderingen terug te vinden te zijn. In dit artikel wordt een aantal sonderingen gepresenteerd en beoordeeld op de mogelijkheid om dit type sonderingen te gebruiken in lithostratigrafische beoordelingen.

1.2 Opbouw artikel

Dit artikel gaat o.a. in op de volgende zaken

- Het aardmagnetisch veld
- Magnetometer sonderingen
- Interpretatie van magnetometer sonderingen
- Toepassing van de interpretatie van de magnetometer sonderingen in de geologie van Nederland

2 Het aardmagnetisch veld

2.1 Algemeen

Het aardmagnetisch veld is het magnetisch veld dat de aarde omringt. Aan het aardoppervlak is het aardmagnetisch veld grofweg te beschrijven als een dipoolveld met een magnetische pool in het noorden en een magnetische pool in het zuiden. De posities van de geomagnetische polen vallen niet geheel samen met de geografische polen. De positie van de magnetische polen verandert langzaam en daarmee verandert de richting en sterkte van het magnetisch veld eveneens. De sterkte van een magnetisch veld wordt gemeten met de magnetische fluxdichtheid van het veld, die wordt uitgedrukt in tesla (T), een afgeleide SI eenheid.

2.2 Indicerende sedimenten

Om het aardmagnetisch veld in sedimenten te kunnen registreren moeten voor magnetisme gevoelige mineralen in het sediment aanwezig zijn. In de Nederlandse afzettingen zijn dit veelal ijzer- en nikkelhoudende afzettingen (ferrometalen) en een aantal zeldzame aarden (Lanthaniden). Met name deze laatste komen voor in Monaziet, een mogelijke proxy voor warmere perioden in het Pleistoceen (zie het artikel over Th-U-K op deze [website](#)).

Naarmate een afzetting meer uit organisch materiaal bestaat (meer veenvorming zonder fluviatiele invloeden) zal de registratie van het aardmagnetisch veld minder zijn.

2.3 Componenten

Het aardmagnetische veld kan op elk punt aan het aardoppervlak worden beschreven als een vector, deze loopt evenwijdig aan de aardmagnetische veldlijnen in het betreffende punt en de grootte van deze vector is gelijk aan de veldintensiteit op die locatie. Deze vector kan voor de Nederlandse situatie worden ontbonden in de volgende componenten:

Symbool	Uitleg	Gemiddelde grootte in Nederland (2010)
X	Noordelijke component	$1,9 \cdot 10^4$ nT
Y	Oostelijke component	$-0,5 \cdot 10^4$ nT
Z	Verticale component Z-richting	$4,5 \cdot 10^4$ nT
H	Horizontale intensiteit $H = (X^2 + Y^2)^{0,5}$	$1,9 \cdot 10^4$ nT
F	Totale intensiteit $F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{0,5}$	$4,9 \cdot 10^4$ nT
D	Hoek tussen X en H, declinatie	0 graden
I	Hoek tussen H en F, inclinatie	67 graden

2.4.1 *Gedrag van het aardmagnetisch veld tijdens ompolingen*

2.4.1.1 *X-, Y-richting*

Deze hoofdrichtingen zullen meedraaien met het de locatie van de polen. Indien het totale veld niet in sterkte verandert zullen de X- en de Y-richting samenhangende veranderingen laten zien, soms complementair en soms radicaal. Door het verschil in sterkte in de primaire richting (vandaag de dag is de X-richting veel sterker dan de Y-richting) kan dit worden geïllustreerd door het laten draaien van de assen van een elips. Bij gelijke sterkte zal het effect veel minder zijn (assen van een cirkel).

2.4.1.2 *Z-richting*

Door het afnemen van het totale aardmagnetisch veld zal het effect op deze richting te meten zijn als een verzwakking.

2.4.1.3 *H-richting*

Deze is afhankelijk van de X- en Y-richting. Er hoeft dus geen effect te zijn.

2.4.1.4 *F-richting*

Door het afnemen van het totale aardmagnetisch veld zal het effect op deze richting te meten zijn als een verzwakking. Deze verzwakt bijvoorbeeld tijdens een ompoling.

2.4.1.5 *Inclinatie, Declinatie*

Deze veranderen sterk tijdens een ompoling, afhankelijk van de X-, Y- en Z-richting.

2.4.2 *Gedrag van gerichte ferrimetalen tijdens bodemvorming*

Na afzetting van continentale sedimenten kan met name het bovenste deel van de bodem gedurende langere tijd door biologische processen worden beïnvloed (bioturbatie). De richting van de ferrimetalen zal door deze bioprocessen worden verstoord. In de sterkte van de verschillende richtingen zal een duidelijke verandering optreden naarmate de bioturbatie langer duurt. Hiermee zullen tevens de afgeleide waarden (inclinatie en declinatie) veranderen.

2.4.3 *Gedrag van ferrimetalen tijdens afzetting*

Als sediment wordt afgezet in een rustige omgeving kan een groot deel van de ferrimetalen zich naar de polen richten. Indien de afzetting in een onrustige omgeving plaatsvindt (e.g. brandingszone) zal de richting minder duidelijk worden vastgelegd. Bij afzettingen die gevormd zijn ten gevolge van sterk catastrofale gebeurtenissen (afschuivingen, tsunami's in een kustomgeving etc.) zal de gerichtheid voor een groot deel kunnen wegvallen.

2.4.4 Gedrag van ferrimetalen tijdens postdepositionele processen

Na afzetting van bodemlagen kunnen ferrimetalen (vnl. ijzer) worden gemobiliseerd en opnieuw worden afgezet onder invloed van redoxomstandigheden. Bij kwelsituaties kan ijzer worden geconcentreerd in gleyhorizonten (e.g. Kattenberg, 2008), bij infiltratie kan ijzer worden geconcentreerd in zgn. oer-banken. Deze horizonten zijn door hun ijzerrijkdom herkenbaar in magnetometersonderingen, vaak als plotselinge afwijking van een gemiddelde waarde. Een derde belangrijk postdepositioneel proces is de vorming van ijzersulfiden in een marien/estuariën/deltaïsch milieu. Door inundatie met zout water kunnen binnen een aantal uren tot dagen (zie Kattenberg 2008, pp 74) ferrimetalen in oplossing gaan en neerslaan als ijzersulfide (sideriet, pyriet). In de omgeving van Delft-Schiedam kan dit tijdens de post-glaciale zeespiegelstijging een vaak voorkomend proces zijn geweest.

2.5 Datering van de ompolingen

Uit het Pleistoceen zijn de volgende ompolingen bekend met in deze de belangrijkste excursies (Channell, 2007; Singer, 2008):

Chron	Excursie	Datering
Brunhes	Blake	0,12 Ma
	Pringle Fall	0,21 Ma
	West Eifel-5	0,53 Ma
	West Eifel-4	0,56 Ma
	Big Lost	0,58 Ma
	West Eifel-2	0,63 Ma
	West Eifel-1	0,73 Ma
B/M		0,78 Ma
Matuyama	Jaramillo	0,99 Ma - 1,07 Ma
	Cobb Mountain	1,20 Ma
	Olduvai	1,77 Ma – 1,95 Ma
	Reunion I	2,14 Ma
M/G		2,58 Ma

3 Magnetometer Sonderingen

3.1 Algemeen

De afwijking in het aardmagnetisch veld kan gemeten worden met een zogenaamde vectoriele magnetometer. Hierin wordt de sterkte van het aardmagnetisch veld in drie richtingen (X, Y en Z) gemeten ten opzichte van de gerichtheid van, in het geval van sonderingen, de sonde. Naast de vectoriele magnetometer wordt het aardmagnetisch veld gemeten met een scalaire magnetometer. Hiermee wordt de absolute sterkte van het aardmagnetisch veld gemeten

3.2 Analyseren van sondeerwaarden

De door Fugro gebruikte methode wordt voornamelijk toegepast voor het bepalen van de diepte van ferrimagnetische objecten. Over het gebruik van deze sondeerwaarden voor stratigrafische doeleinden is geen referentie gevonden op het Internet.

3.2.1 Detectie grensvlakken

Uitgaande van het principe dat tijdens perioden van non-depositie de zone net onder het maaiveld door bioturbatie wordt verstoord, zouden dit soort oppervlakten zichtbaar kunnen zijn als verzwakkingen van de totale intensiteiten H en F. Hiernaast kunnen onrustige afzettingssomstandigheden gedetecteerd worden. Grensvlakken kenmerken zich door kortdurende pieken en dalen in de meetcurven.

3.2.2 Detectie reversals

In tegenstelling tot de paleo-oppervlakten kenmerken reversals zich in de metingen door langdurige veranderingen in het aardmagnetisch veld.

3.3 Piekanalyse

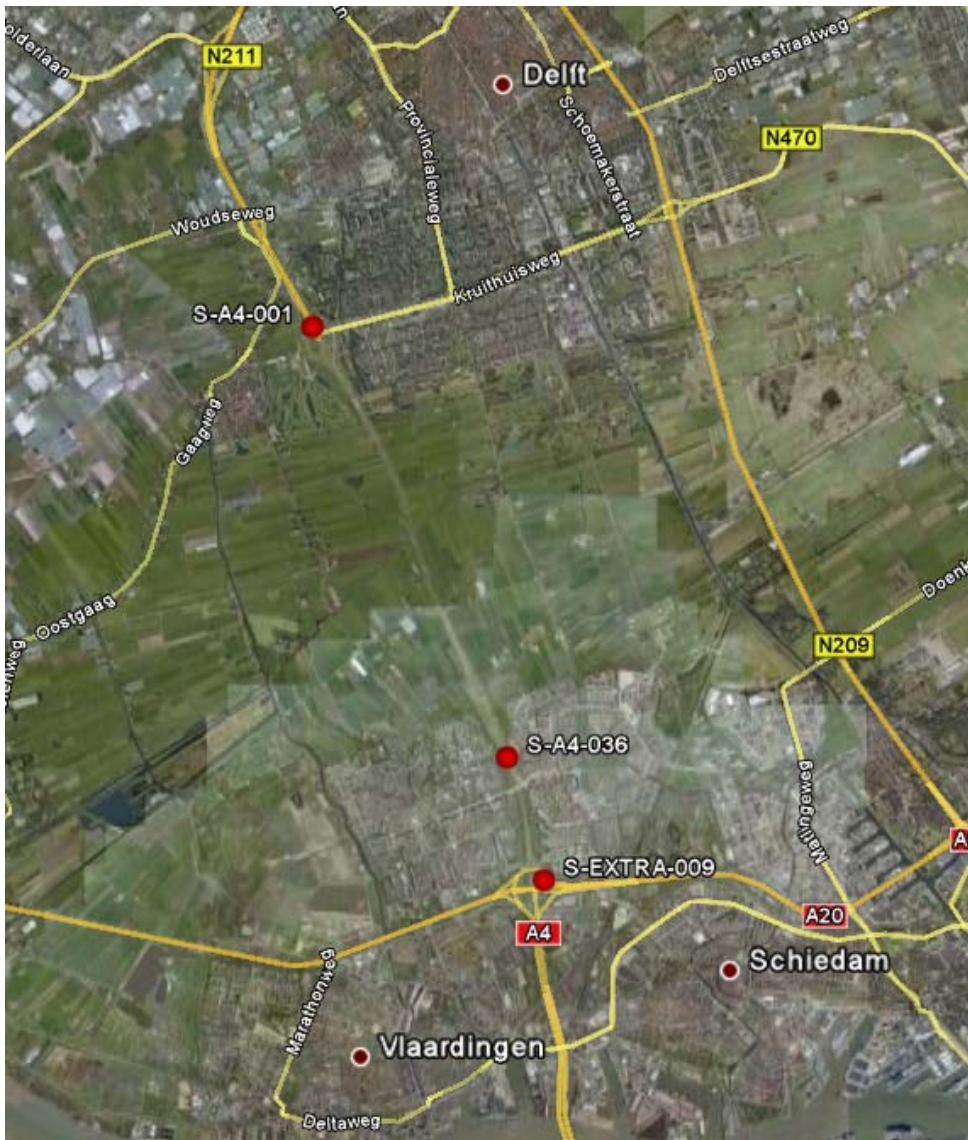
Naast het grafisch in beeld brengen van de X-, Y-, en Z-meting en hun samengestelde waarden, kan de eerste afgeleide van de X-, Y-, en Z-meting worden bepaald. Deze eerste afgeleide is berekend uit de verandering (absoluut) per meetinterval, dus $\delta\text{waarde}/\delta h$. Indien de afgeleide van de X-, Y-, en Z-meting bij elkaar wordt opgeteld ontstaat er een beeld van de intensiteit van een verandering. Deze afwijking is naast de grafieken in hoofdstuk 4 opgenomen. Met name de pieken in de grafiek worden als indicatief beschouwd voor de verandering van het aardmagnetisch veld.

4 Metingen

4.1 A4

4.1.1 Locatiebeschrijving

Voor de aanleg van de aansluiting van de A4 tussen Delft en Schiedam zijn 203 sonderingen geplaatst. Hiervan is een deel uitgevoerd (139) als magnetometer sondering. Veel sonderingen zijn op korte afstand van elkaar gemaakt. De sonderingen zijn bewerkt om de aardmagnetische parameters grafisch weer te geven. Uit deze sonderingen is een selectie gemaakt, een sondering (S-A4-001) staat vlak bij Delft, een staat tussen de woonwijken van Schiedam (S-A4-036) en een staat op het Kethelplein (S-extra-009). De selectie is gebaseerd op duidelijke afwijkingen in de registratie.



Locatie geselecteerde sonderingen

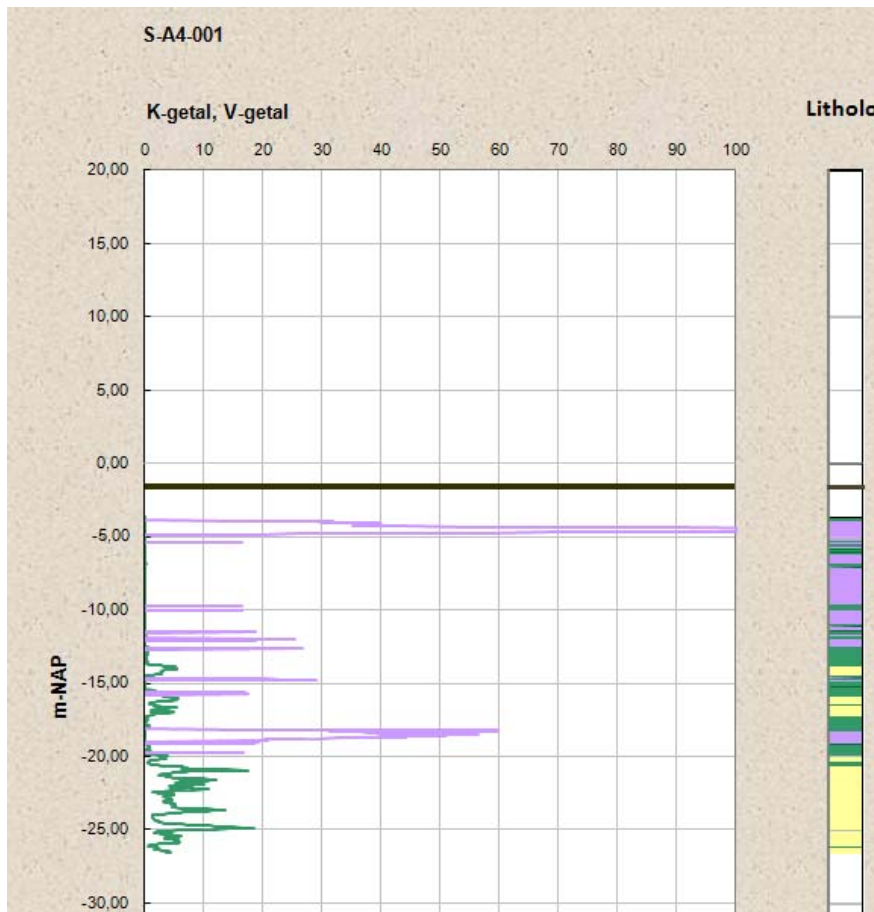
4.1.2 *Ondergrondbeschrijving*

De ondergrond van dit deel van Zuid-Holland wordt gekenmerkt door het voorkomen van een tot 20 meter dikke deklaag, opgebouwd tijdens het Holoceen, gelegen op minimaal 7 meter laat-Weichselien zanden. Hieronder komt op een aantal locaties een afzetting voor die op basis van flora- en faunagegevens uit boring Zuurland (zie elders op deze [website](#)) tot een vroeg deel van de Sterksel-afzettingen kan worden gerekend. Onder -34 [m+NAP] liggen vroeg-Pleistocene zanden en kleien behorende tot de Tegelen afzettingen. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Hijma (2009), Cohen (2005).

4.1.3 Beschrijving geselecteerde sonderingen

4.1.3.1 Sondering S01

Deze sondering is gezet aan het begin van het aan te leggen traject bij Delft. Een opvallend traject in de metingen is een sequentie die ligt tussen circa -15 [m+NAP] en -20 [m+NAP]. De boven en de onderzijde van deze sequentie zijn bij Hijma te vergelijken zijn een datering van 8450 kalenderjaar BP (Cal BP; BP 0 = 1950 AD). De bovenzijde ligt rond 8200 Cal BP). Deze sequentie is mogelijk te correleren met de zeer snelle zeespiegelstijging ten gevolge van de leegloop van Lake Agassiz (Hijma, 2009). 2,70 Meter hierboven bevindt zich een uitgesproken signaal in de Totale intensiteit, misschien te correleren met de SSTsun (Sunnega Slide Tsunami zie o.a. Weninger 2008), op basis van een gemiddelde zeespiegelstijging van 1,25 meter per 100 jaar, te dateren op circa 8050 Cal BP. Figuur 4.1.3.1.1 geeft een interpretatie van de opbouw van de ondergrond bij deze sondering.



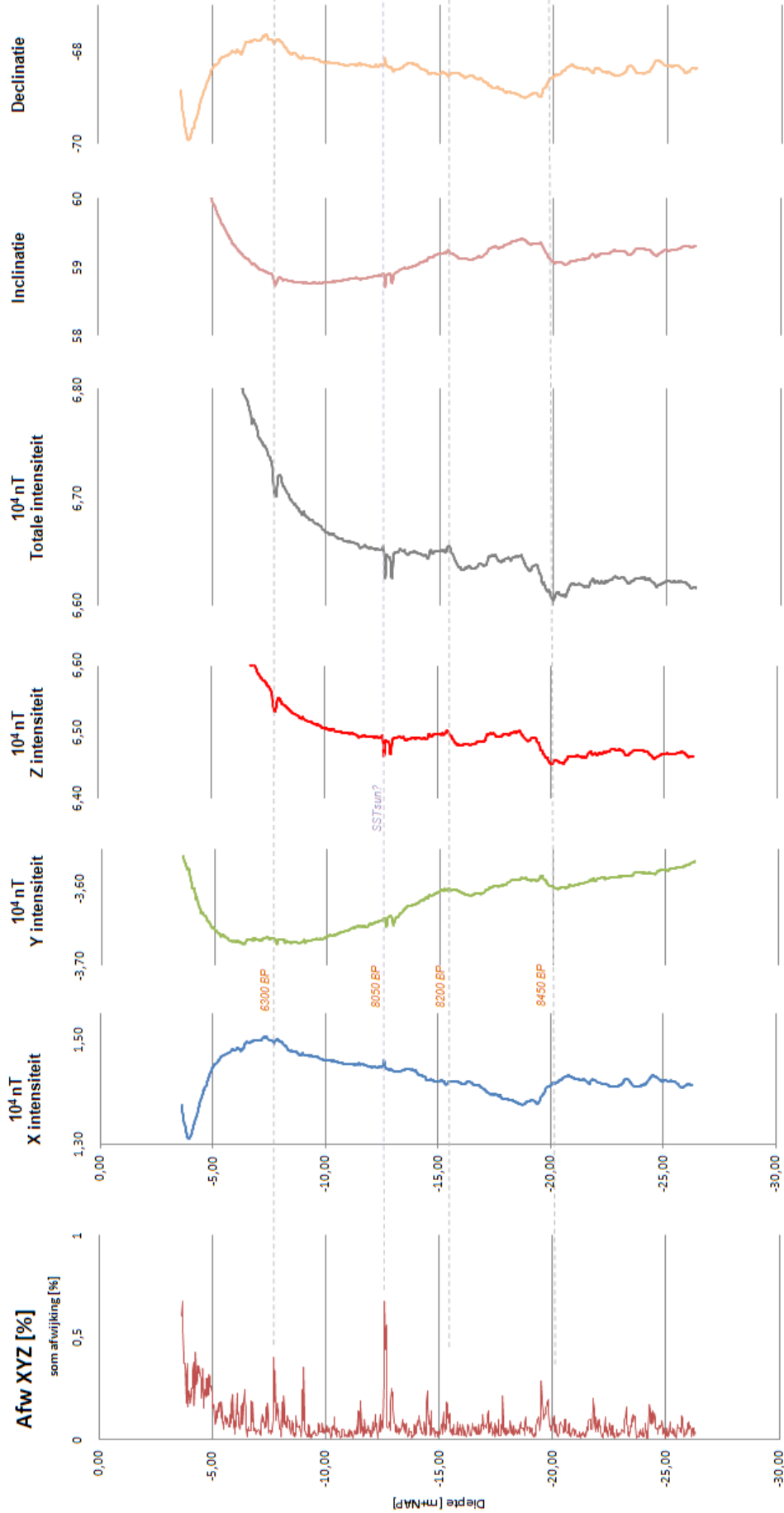
Figuur 4.1.3.1.1

Opbouw ondergrond
a.d.h.v. sondeer-
gegevens

Klei, kleilig veen en
veenlagen

Klei met veenlagen, lokaal
kleiige zandlagen

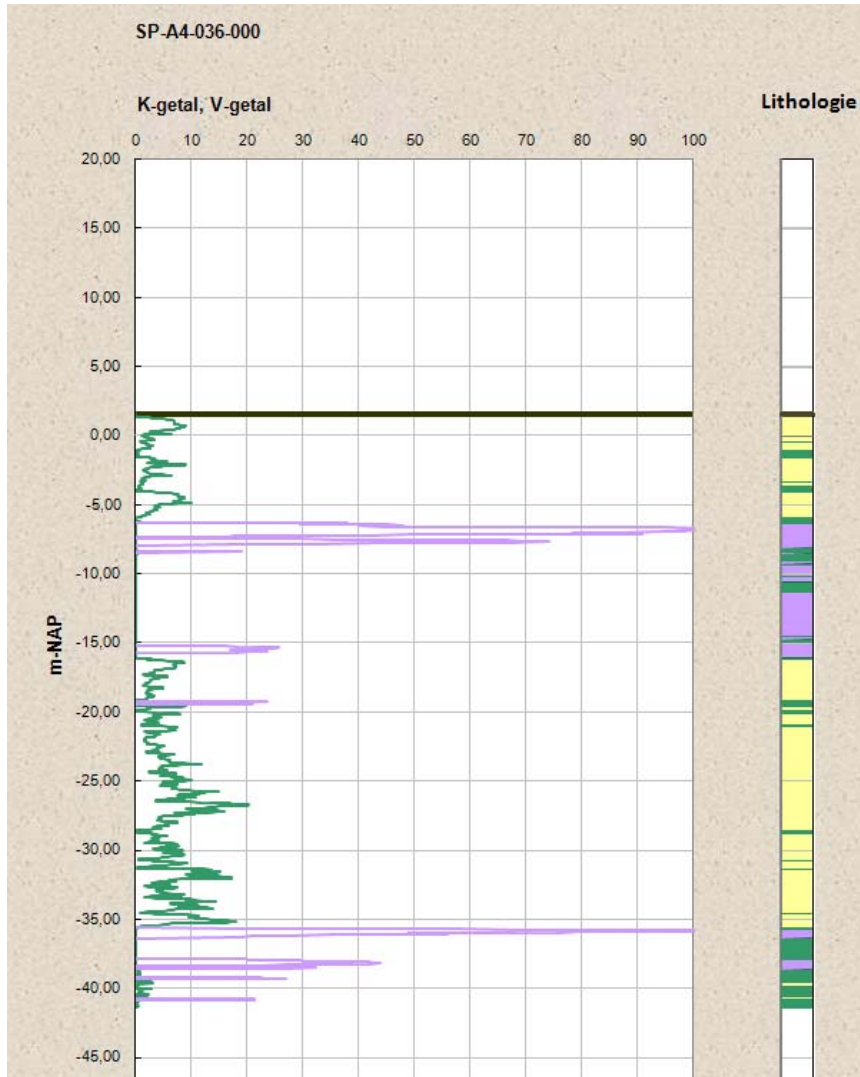
Matig fijn zand, lokaal
grovere trajecten



S01

4.1.3.2 Sondering S36

Deze sondering is gezet tussen de woonwijken van Schiedam. In de grafiek van de totale intensiteit zijn twee opvallende pieken mogelijk te correleren met de tijdslijnen van 8450 Cal BP en 8200 Cal BP. Deze sequentie is hiermee vergelijkbaar met de sequentie in S01. Een opvallend hoger gelegen piek ligt 5,7 meter hoger met een top op -10 [m+NAP]. Als dit inderdaad een signaal is ten gevolge van de Storega Slide Tsunami ligt dit hoger dan S01. Mogelijk dat op -34,5 [m+NAP] de Matuyama/Olduvai reversal is gemeten. In figuur 4.1.3.2.1 is de opbouw van de ondergrond grafisch weergegeven.



Figuur 4.1.3.2.1

Opbouw ondergrond
a.d.h.v. sondeergegevens

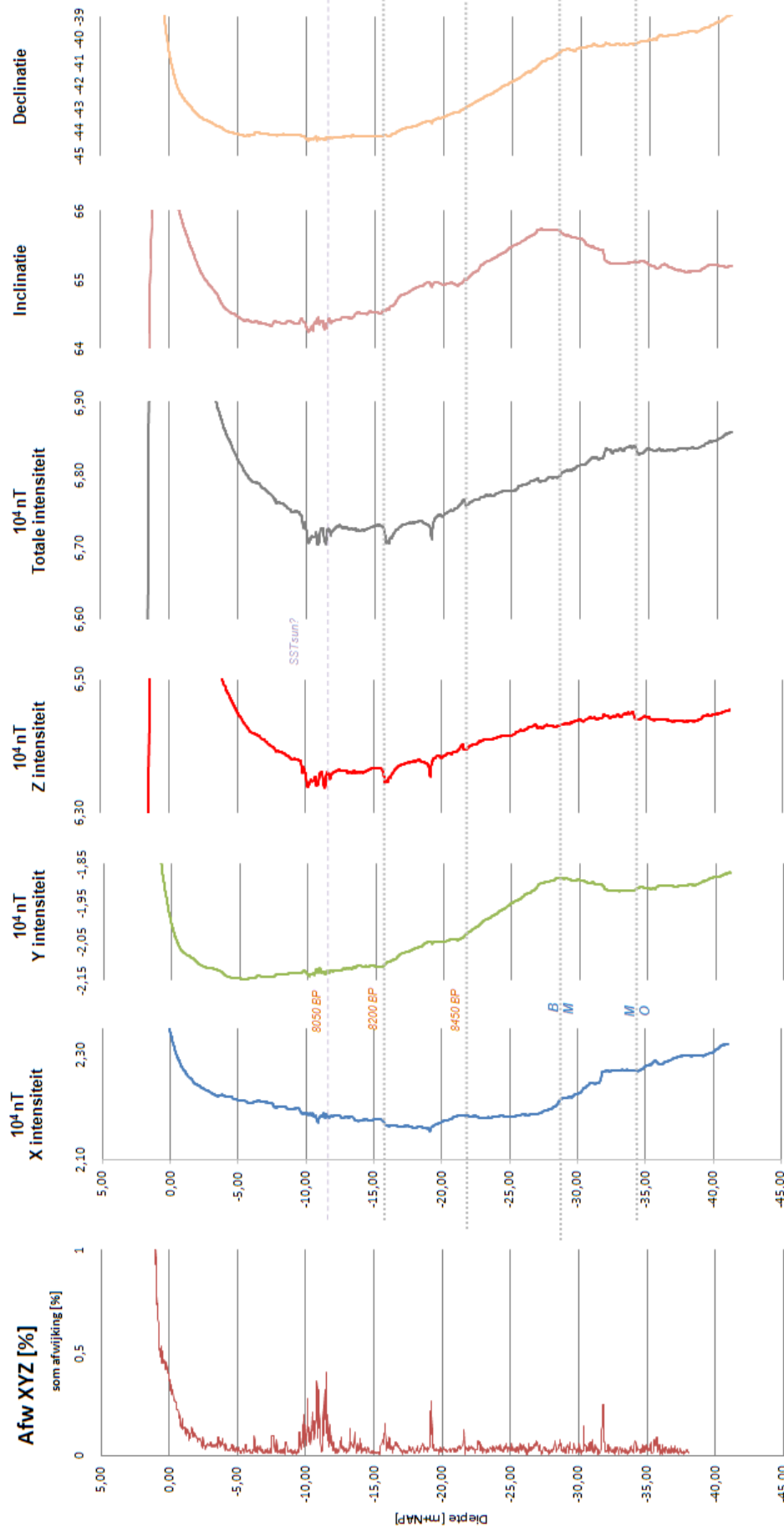
Opgebracht materiaal

Kleiig veen en veenlagen

Fijn-zandlaag met veenlaag
aan top

Matig fijn zand tot zand
Matig fijn zand met grove
zandlagen

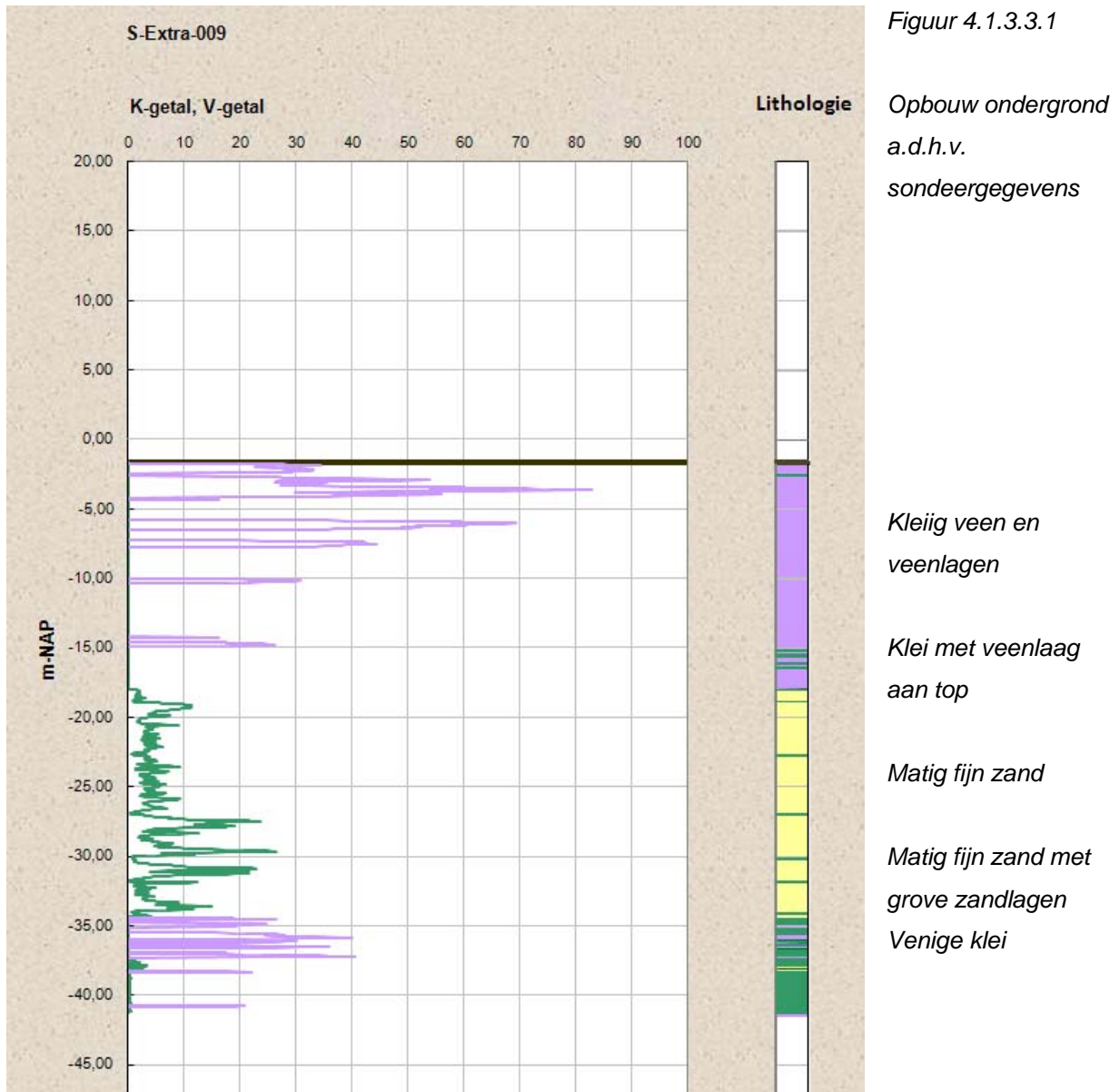
Venige klei

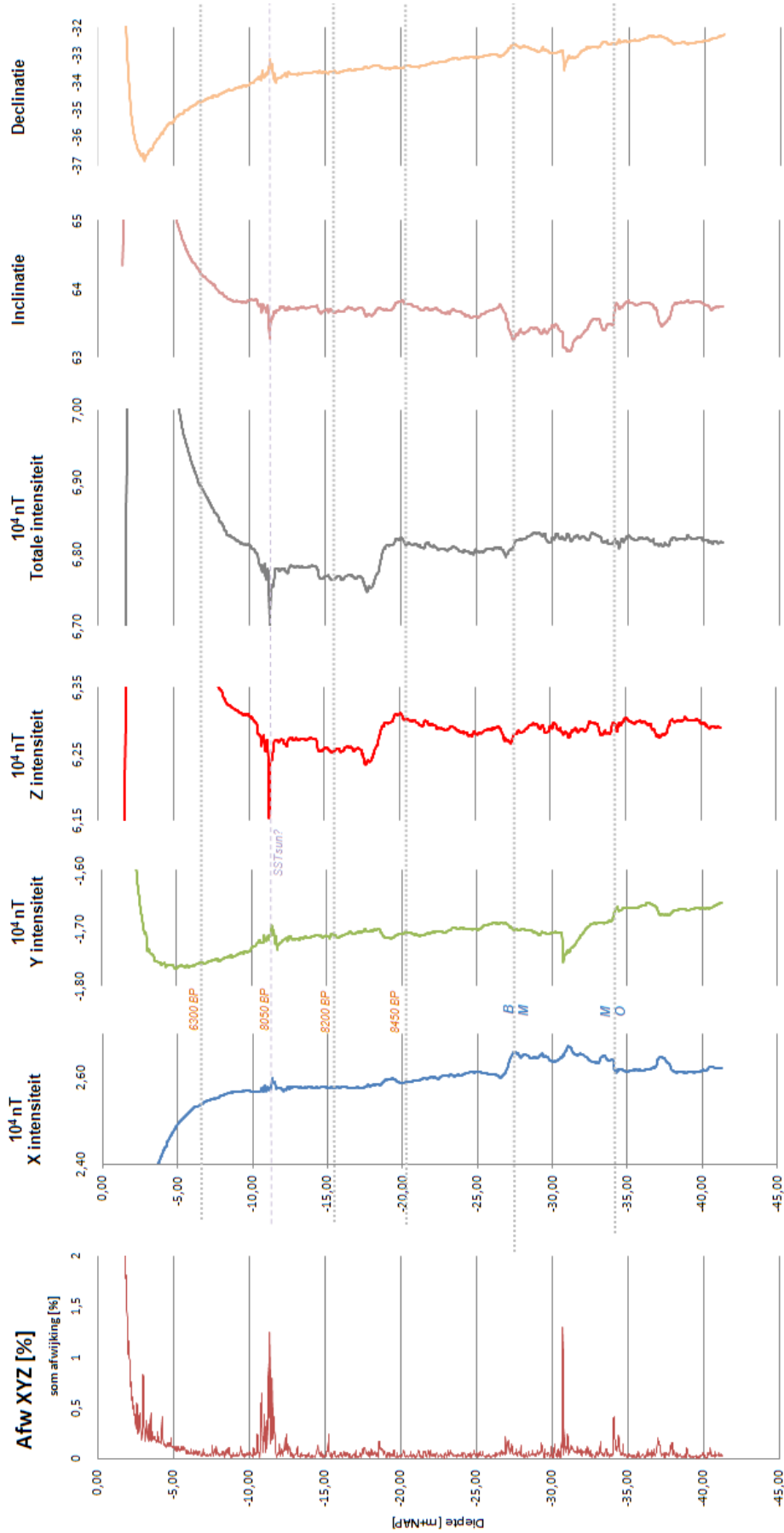


S 36

4.1.3.3 Sondering S-Extra-009

Deze sondering is gezet aan het eind van het aan te leggen traject bij het Kethelplein. Op -27 [m+NAP] ligt een piek die mogelijk te correleren is met de Brunhes/Matuyama ompoling. In deze omgeving zijn op vergelijkbare diepteligging afzettingen gevonden (zie boring Zuurland op deze [website](#)) die te dateren zijn op vroeg Cromerien, dus mogelijk rond de B/M ompoling. Op -34 [m+NAP] is mogelijk de M/O ompoling aangetroffen. In onderstaande figuur 4.1.3.3.1 is de opbouw van de ondergrond, aan de hand van deze sondering, weergegeven.

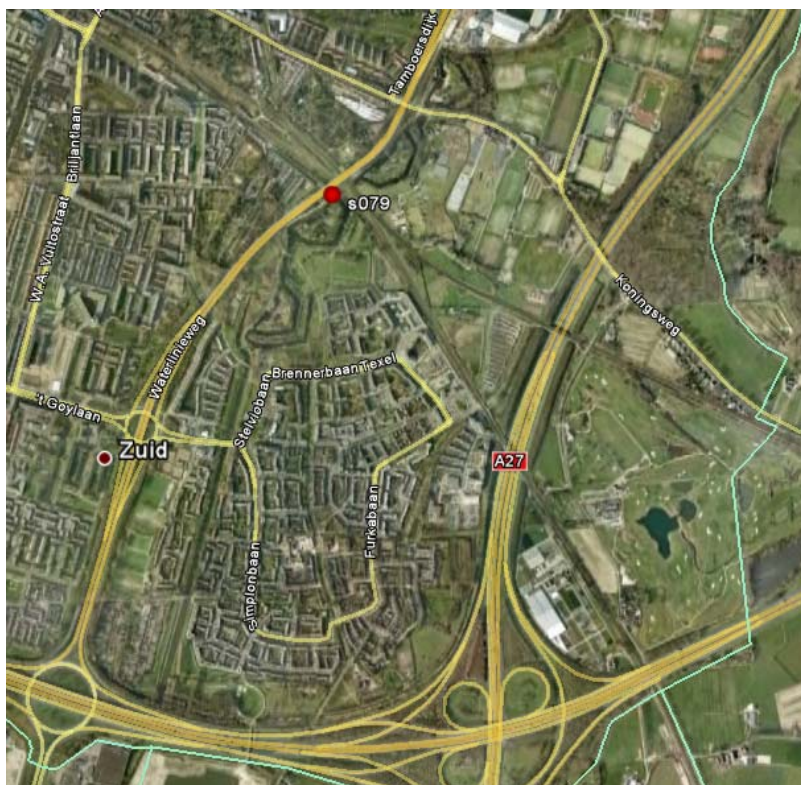




S-Extra-009

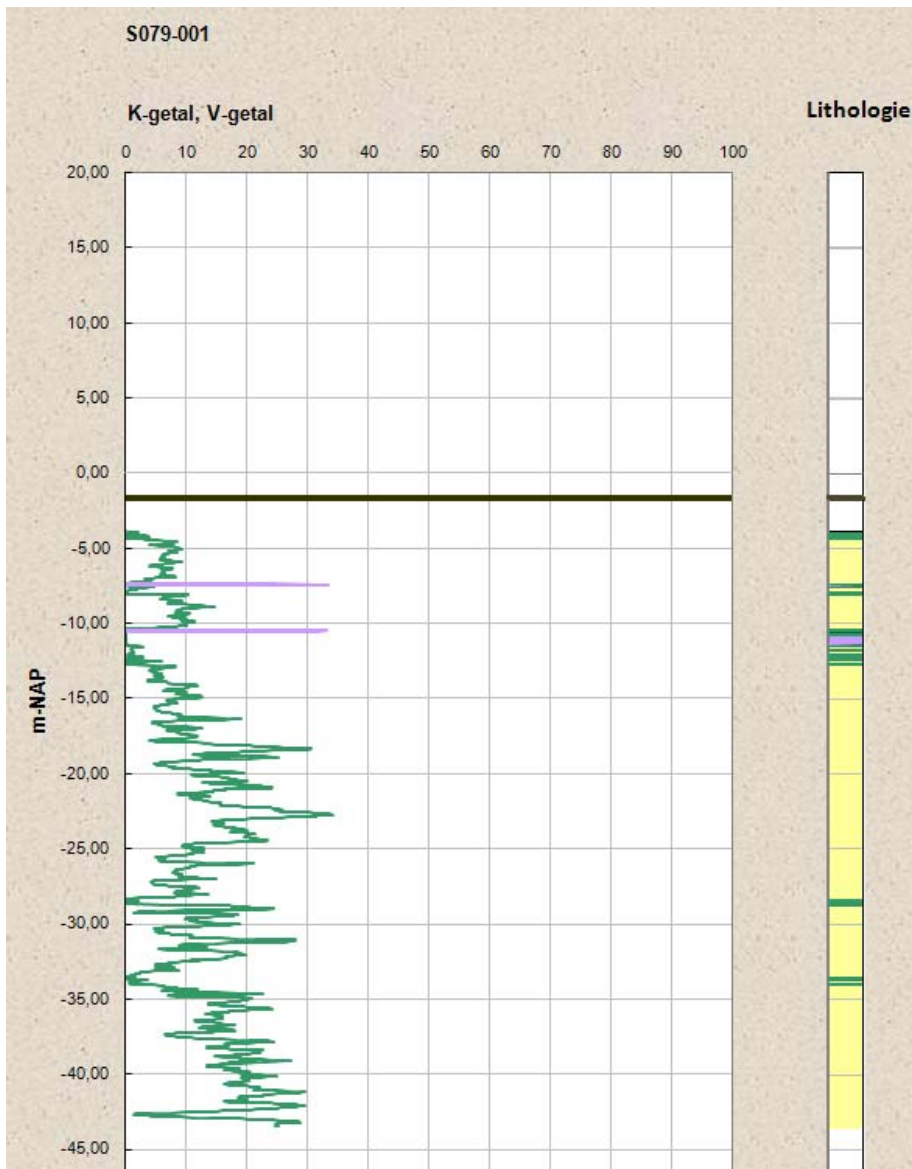
4.2 Utrecht

Ten behoeve van de uitbreiding van het aantal sporen nabij station Lunetten in Utrecht is een zestal sonderingen met magnetometer gezet. Van deze sonderingen is S079, op de kruising van de spoorlijn met de Waterlinieweg, de diepste. De ligging van S079 is opgenomen in figuur 4.2,.1



Figuur 4.2.1 Ligging S079 in zuidoost Utrecht

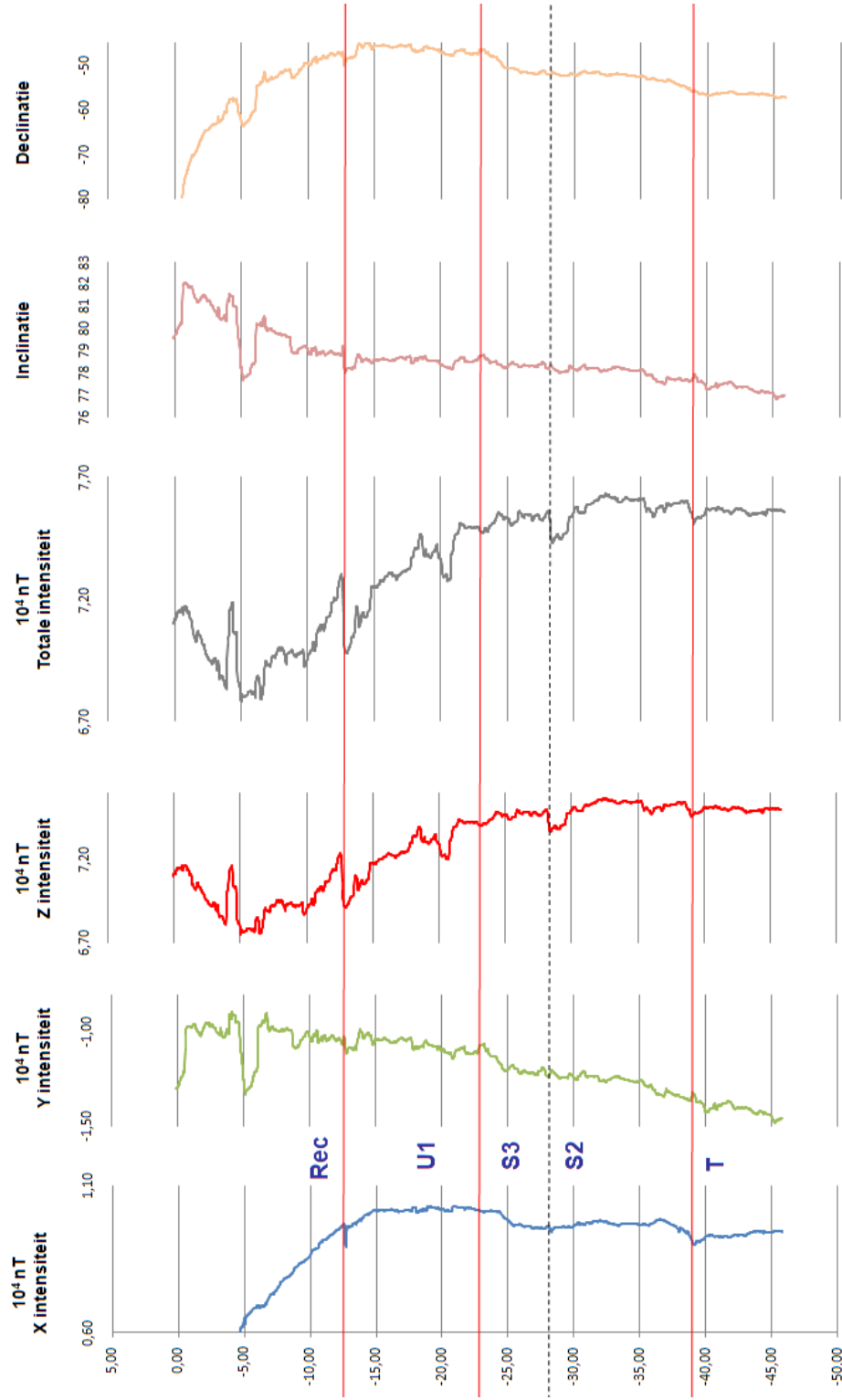
De opbouw van de bodem op basis van sondeergegevens is opgenomen in figuur 4.2.2. De indeling in lagen is indicatief op basis van o.a. het Regis model van TNO. Opvallend is dat in de magnetometer sondering de laagscheidingen erg duidelijk tot uiting komen. De magnetische reversal Brunhes/Matuyame (B/M) ligt in theorie aan de bovenzijde van de S2 sequentie, op -28,14 [m+NAP]. Deze waarde is vergelijkbaar met de diepteligging van de B/M bij Schiedam. Zie voor de Sterksel afzettingen de webpagina elders op deze [website](#). Opvallend detail. De grens tussen recente afzettingen en de Urk afzettingen ligt rond -12,16 [m+NAP]. Een waarde waar bij Schiedam mogelijk een indicatie voor de Storegga Slide tsunami gevonden worden.



Figuur 4.2.2
Opbouw ondergrond
a.d.h.v.
sondeergegevens

Afwisseling klei, veen en
zandklagen

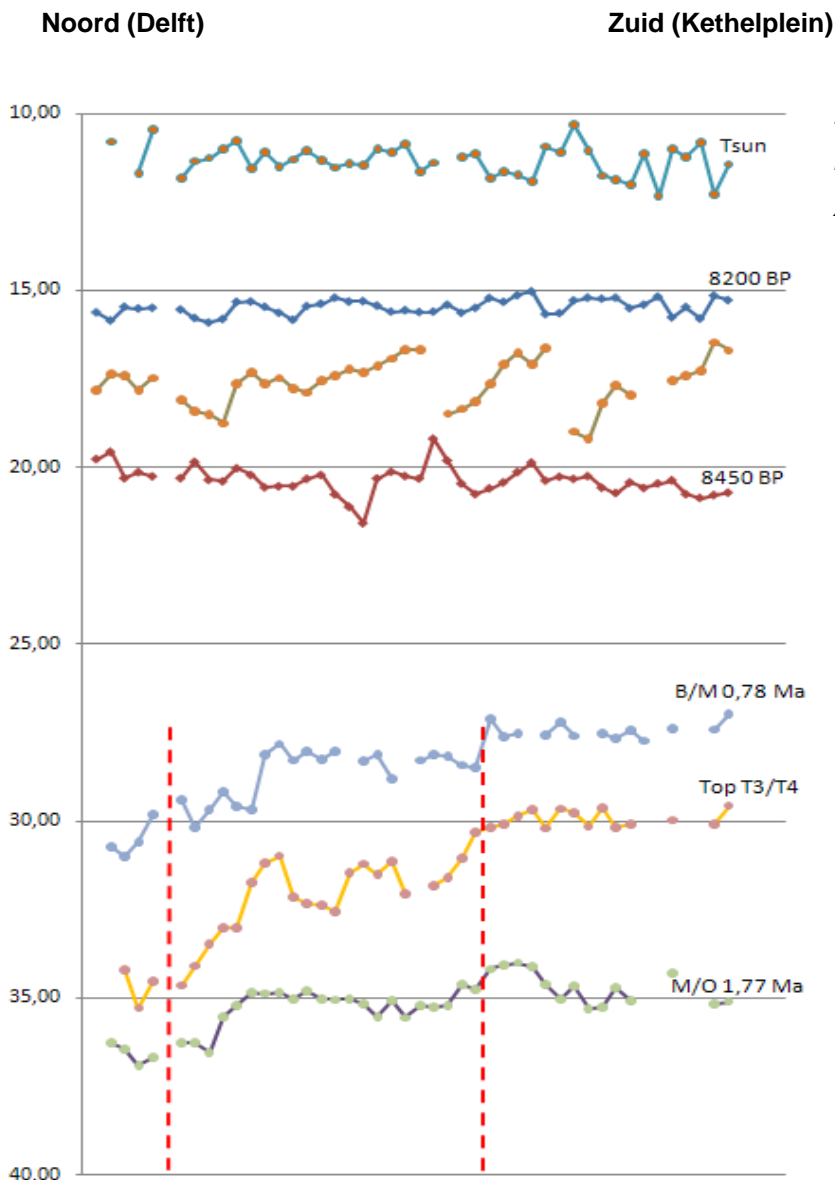
Matig grof tot grof zand,
lokaal met dunne
kleilagen



S 079

4.3 Piekanalyse

Indien de sonderingen langs de A4 worden geanalyseerd op het voorkomen van pieken in de XYZ-afwijkingsgrafiek komt een redelijk consistent beeld naar voren. Opgemerkt wordt dat niet in alle sonderingen de XYZ-afwijking hetzelfde, sterke, signaal geeft. Een groot gedeelte van de pieken liggen op vergelijkbare hoogten. Met name de pieken die een mogelijk signaal van de Storegga Slide tsunami vertegenwoordigen (in figuur 4.3.1. de bovenste grijze lijn), tussen -11 [m+NAP] en -12,5 [m+NAP] zijn herkenbaar. De 8200 BP lijn (donkerblauw) en de 8450 BP lijn (roodbruin) liggen gemiddeld $4,78 \pm 0,86$ meter uit elkaar. Hijma geeft in 2009 een waarde van $4,06 \pm 0,50$ meter. Tussen deze twee lijnen komt een extra pieksignaal voor wat grafisch gezien te interpreteren is als interne deltastructuren. De serie pieken die mogelijk de Brunhes/Matuyama vertegenwoordigt kent twee duidelijk sprongen ter hoogte van mogelijke breuken. De top van de Tegelen afzettingen (Top T3/T4) en de Matuyama/Olduvai grens vertonen vergelijkbare sprongen.



Figuur 4.3.1.
Diepteligging pieken in de XYZ afwijking grafiek.

5 Bevindingen

5.1 Discussie

Door middel van magnetometer sonderingen kan een beeld van de ondergrond worden gegenereerd wat een nuttige aanvulling kan geven op de interpretatie van de bodemopbouw. Met name grensvlakken, hetzij ten gevolge van catastrofale gebeurtenissen (e.g. tsunami's), hetzij ten gevolge van ingrijpende gebeurtenissen (snelle stijging van de zeespiegel) lijken als duidelijke anomalieën in het aardmagnetisch veld tot uiting te komen in de verschillende grafieken. Opvallend is dat in meer zandige afzettingen (S079, Utrecht), de anomalieën heftiger zijn dan in de meer kleiige afzettingen bij Schiedam. Dit zou kunnen wijzen op de theorie van Kattenberg dat met name een inundatie met zout water tot mobilisatie van (en daarmee een afname van) de ferrimetalen leidt. Dit proces zal in doorlatende grond intenser zijn dan in minder doorlatende grond. De reversals zijn mogelijk ook zichtbaar, in sommige sonderingen is dit soort signaal echter veel meer uitgesproken dan in andere sonderingen. Hiernaast is er geen onderscheid te maken tussen grensvlakken en potentiële reversals. Aan het opsporen van reversals met behulp van magnetometer sonderingen kan hoogstens een bevestigende waarde worden gehecht.

5.2 Conclusie

Magnetometer sonderingen geven een aanvullende invalshoek om naar de opbouw van de ondergrond te kijken. Gezien het feit dat het zetten van dit soort sonderingen goedkoper en sneller is dan het verrichten van boringen kan deze methode toch aanvullend zijn voor onderzoek naar het verloop van grensvlakken in de ondergrond. Een bijzondere aanvullende waarde hebben mijns inziens dit soort sonderingen voor het detecteren van grensvlakken in kustnabije sedimenten. Opvallend is de mogelijk grote bijdrage die deze methode kan hebben voor het detecteren van grensvlakken binnen een serie gelijke afzettingen (bijvoorbeeld verschillende zandige sequenties boven elkaar). De dikke klei- en veenlagen in West-Nederland of de grove zanden in de omgeving van Utrecht blijken opvallend nauwkeurig in te delen te zijn op basis van magnetometer sonderingen. Hiermee kunnen lithostratigrafische indelingen ten behoeve van bijvoorbeeld hydrologische modelstudies verder worden verbeterd.

6 Literatuur

Busschers, F. et al	2005	Sedimentary architecture and optical dating of Middle and Late Pleistocene Rhine-Meuse deposits – fluvial response to climate change, sea-level fluctuation and glaciation	Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw 84 – 1 25 - 41 2005
Channell, J.E.T.	2007	Geomagnetic Excursions	http://www.elsevierdirect.com/brochures/geo-physics/PDFs/00095.pdf
Hijma, M	2009	From river valley tot estuary	Thesis, Universiteit Utrecht
Kattenberg, A.	2008	The Application of Magnetic Methods for Dutch Archaeological Resource Management	Thesis, Vrije Universiteit
NOAA	2010	US/UK World Magnetic Model -- Epoch 2010.0	http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/
Singer, B.S.	2008	Multiple Brunhes Chron excursions recorded in the West Eifel volcanics	Physics of the Earth and Planetary Interiors, 169 (2008) pp. 28-40
Weninger, B. et al	2008	The catastrophic final flooding of Dogeogland by the Storegga Slide Tsunami	Documenta Praehistorica XXXV

7 Inhoud

1	Paleomagnetisme en sondeercurves	1
1.1	Inleiding.....	1
1.2	Opbouw artikel	1
2	Het aardmagnetisch veld	2
2.1	Algemeen	2
2.2	Indicerende sedimenten.....	2
2.3	Componenten.....	2
2.4	Ompolingen.....	3
2.4.1	Gedrag van het aardmagnetisch veld tijdens ompolingen	4
2.4.2	Gedrag van gerichte ferrimetalen tijdens bodemvorming	4
2.4.3	Gedrag van ferrimetalen tijdens afzetting	4
2.4.4	Gedrag van ferrimetalen tijdens postdepositionele processen	5
2.5	Datering van de ompolingen	5
3	Magnetometer Sonderingen	6
3.1	Algemeen	6
3.2	Analyseren van sondeerwaarden.....	6
3.2.1	Detectie grensvlakken	6
3.2.2	Detectie reversals	6
3.3	Piekanalyse.....	6
4	Metingen.....	7
4.1	A4.....	7
4.1.1	Locatiebeschrijving	7
4.1.2	Ondergrondbeschrijving.....	8
4.1.3	Beschrijving geselecteerde sonderingen	9
4.2	Utrecht	15
4.3	Piekanalyse.....	18
5	Bevindingen.....	19
5.1	Discussie.....	19
5.2	Conclusie	19
6	Literatuur	20
7	Inhoud.....	21