

IWT SBO PROJECT 120003 “SEARCH”

Archaeological heritage in the North Sea

Development of an efficient assessment methodology and approach towards a sustainable management policy and legal framework in Belgium.

Archeologisch erfgoed in de Noordzee

Ontwikkeling van een efficiënte evaluatiemethodologie en voorstellen tot een duurzaam beheer in België.



SCIENTIFIC RESULTS ON LIDAR: INTENSITY ANALYSIS WP 1.3.6. A

Responsible partners: UG-GEO, UG-RCMG

Auteurs: Michiel Decock, Annelies Vandenbulcke, Cornelis Stal, Alain De Wulf

Augustus 2016

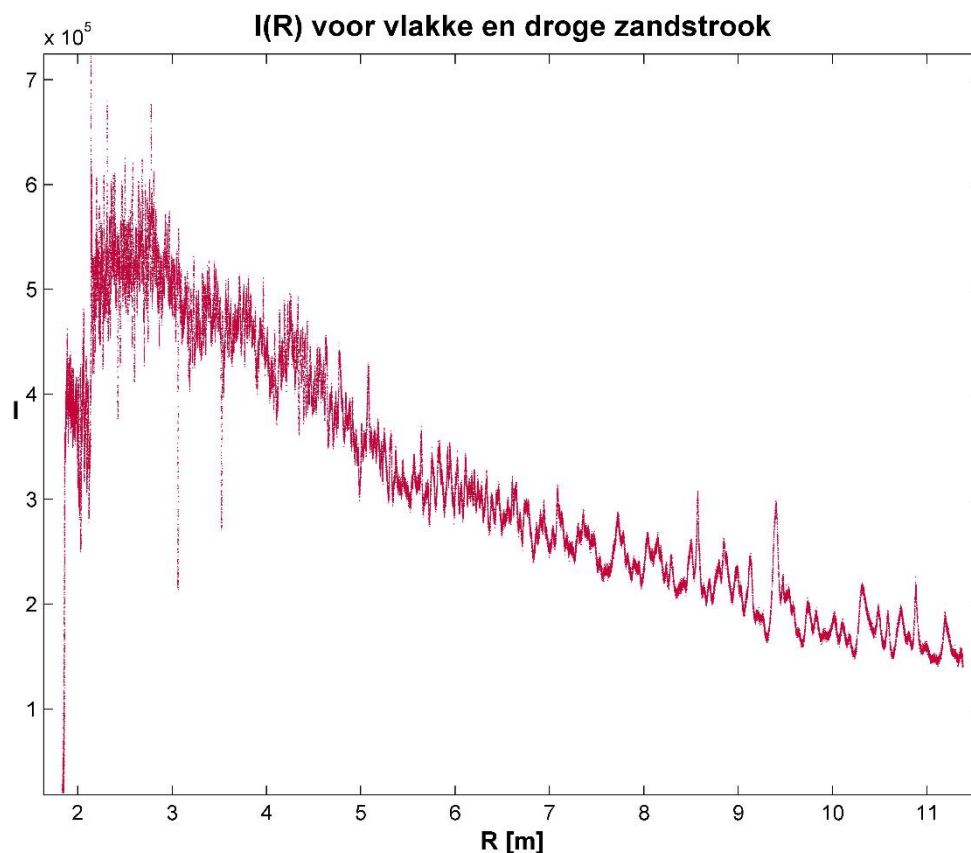
Overzicht

1. Inleiding	3
2. Aangewende wiskundige modellen	5
3. Kalibratiemetingen	6
4. Strandmetingen.....	11
5. Besluit	14
6. Referenties	14

1. Inleiding

Om het micro-reliëf van de testzones in kaart te brengen, werd gebruik gemaakt van een mobiele vorm van laserscanmetingen (Mobile Terrestrial Laser Scanning). De opgemeten puntenwolken bevatten voor ieder punt de drie cartesische coördinaten en de bijhorende backscatter. Laatstgenoemde is de intensiteit van de laserpuls na reflectie op het zanderige oppervlak. Deze backscatter is afhankelijk van enkele parameters, waaronder de afstand tot de bron, materiaalparameters en de invalshoek. Aangezien de intensiteitswaarden in rechtstreeks verband staan met de morfologie, kan op basis van een intensiteitsmap het micro-reliëf gevisualiseerd worden. Hiervoor dient de backscatter eerst gecorrigeerd te worden door rekening te houden met hogervermelde parameters. Enkel een correctie op basis van de invalshoek zal niet uitgevoerd worden, omdat deze geometrische (en aldus morfologische) informatie bevat. Indien elke parameter in rekening gebracht zou worden, zou de intensiteit van ieder punt uit de puntenwolk dezelfde waarde bereiken, zodat morfologische informatie verloren gaat.

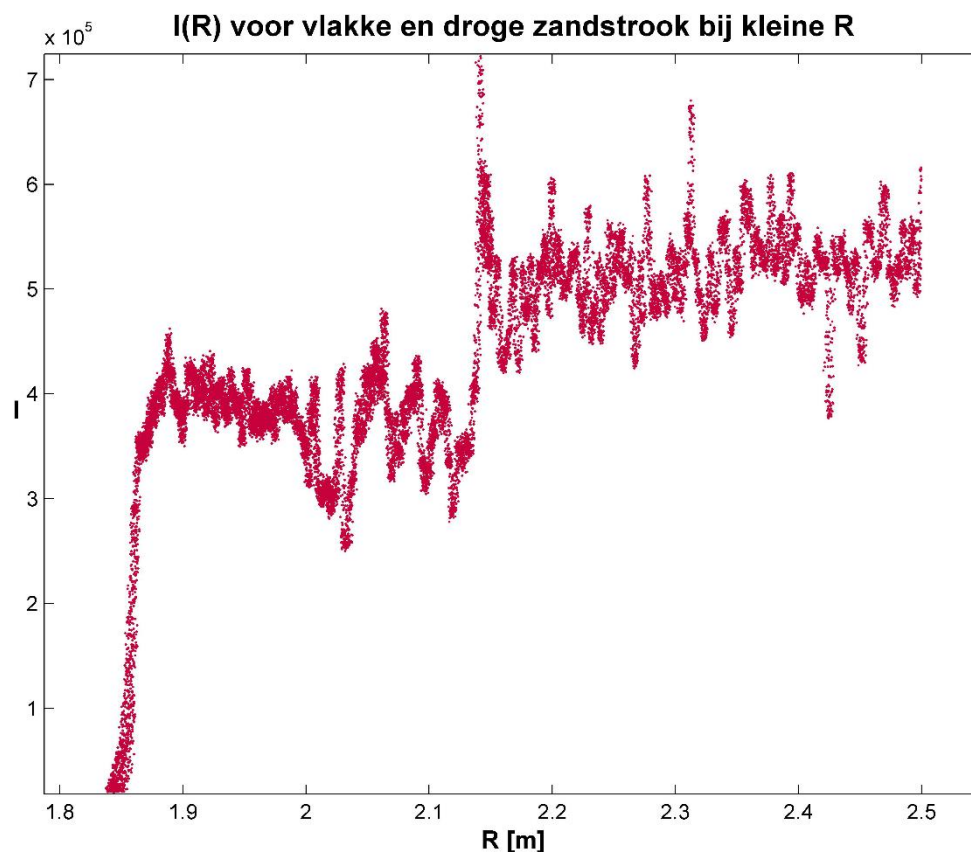
In wat volgt wordt nagegaan welk wiskundig model optimaal de afhankelijkheid van de geregistreeerde intensiteit in functie van de radiële afstand beschrijft. Hierbij zullen vijf intrinsiek verschillende modellen beschouwd worden: exponentieel, machtswet, logaritmisch en tweemaal het gebruik van een polynoom van graad k . De polynomen zullen enerzijds gefit worden aan $I(R)$ en anderzijds aan $(1/I)(R)$. Om te concluderen welk verband optimaal is, wordt enerzijds gebruikgemaakt van de determinatiecoëfficiënt R^2 van het model en anderzijds van de standaarddeviatie σ van de datapunten ten opzichte van de best-fit. Het bepalen van zo'n best-fit gebeurt aan de hand van de kleinste-kwadratenmethode.



Figuur 1.1: Verloop van $I(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte.

Het verloop van de intensiteitswaarden I in functie van de radiële afstand R neemt een vorm aan zoals weergegeven in Figuur 1.1. Deze figuur heeft hier betrekking op een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte. Aangezien het zeer moeilijk is om het zand perfect vlak te krijgen, zou het begrip quasi-vlak correcter zijn. Omwille van de eenvoud wordt in het vervolg met vlak telkens quasi-vlak bedoeld.

De data weergegeven in Figuur 1.1 zijn reeds gefilterd door middel van de eigen ontwikkelde automatische ruisfilter. Dit zal ook zo zijn voor de hierna volgende datasets. $I(R)$ zal bij kleine afstanden ($R < 2.5$ m) een stijgende trend vertonen, waarna de intensiteitswaarden gradueel kleiner worden bij groter wordende afstand. De intense stijging van I bij kleine R komt door de aanwezigheid van een reducerend element op de sensor, die ervoor zorgt dat er geen zeer intense elektromagnetische straling geregistreerd wordt. Een detail van $I(R)$ voor $R < 2.5$ m wordt gegeven in Figuur 1.2. Hierop wordt duidelijk weergegeven dat voor $R < 1.9$ m I zeer snel stijgt met stijgende R . Daarna treedt er een overgangszone op waarbij I sterk fluctueert.



Figuur 1.2: Verloop van $I(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte en dit voor $R < 2.5$ m.

Aangezien de minimale schuine afstand bij de strandmetingen ongeveer 2.2 m is, wordt er bij de best-fits enkel rekening gehouden met de intensiteitswaarden bij $R > 2.2$ m. Dit is dus de dalende tak uit Figuur 1.1.

2. Aangewende wiskundige modellen

Om het wiskundig verband tussen I en R te zoeken, zullen vijf intrinsiek verschillende modellen in rekening gebracht worden:

- een exponentieel model, waarbij een lineaire fit gebeurt op $\ln I = a + bR$ met a en b de te zoeken constanten. Dit levert dan volgend verband op:

$$I = a' e^{bR} \quad (2.1)$$

met $a' = e^a$.

- een machtswet, met lineaire fit op $\ln I = a + b \ln R$. Dit resulteert in

$$I = a' R^b \quad (2.2)$$

met opnieuw $a' = e^a$.

- I hangt logaritmisches af van R , waarop tevens de lineaire datafit gebeurt:

$$I = a + b \ln R \quad (2.3)$$

- I is evenredig met een polynoom $p_k(R)$ van graad k . Hierbij zal k gradueel verhoogd worden om te zien of de wijziging in R^2 -waarde en/of σ significant verandert. $I(R)$ kan aldus uitgedrukt worden als

$$I = \sum_{i=0}^n a_i R^i \quad (2.4)$$

- I is omgekeerd evenredig met een polynoom $p_k(R)$ van graad k , waarbij $2 \leq k \leq 4$. De afhankelijkheid van I in functie van R wordt aldus gegeven door (voorbeeld voor een vierde-ordepolynoom. Passende constanten worden nul gesteld voor lagere orde polynomen):

$$I = 1/(aR^4 + bR^3 + cR^2 + dR + e) \quad (2.5)$$

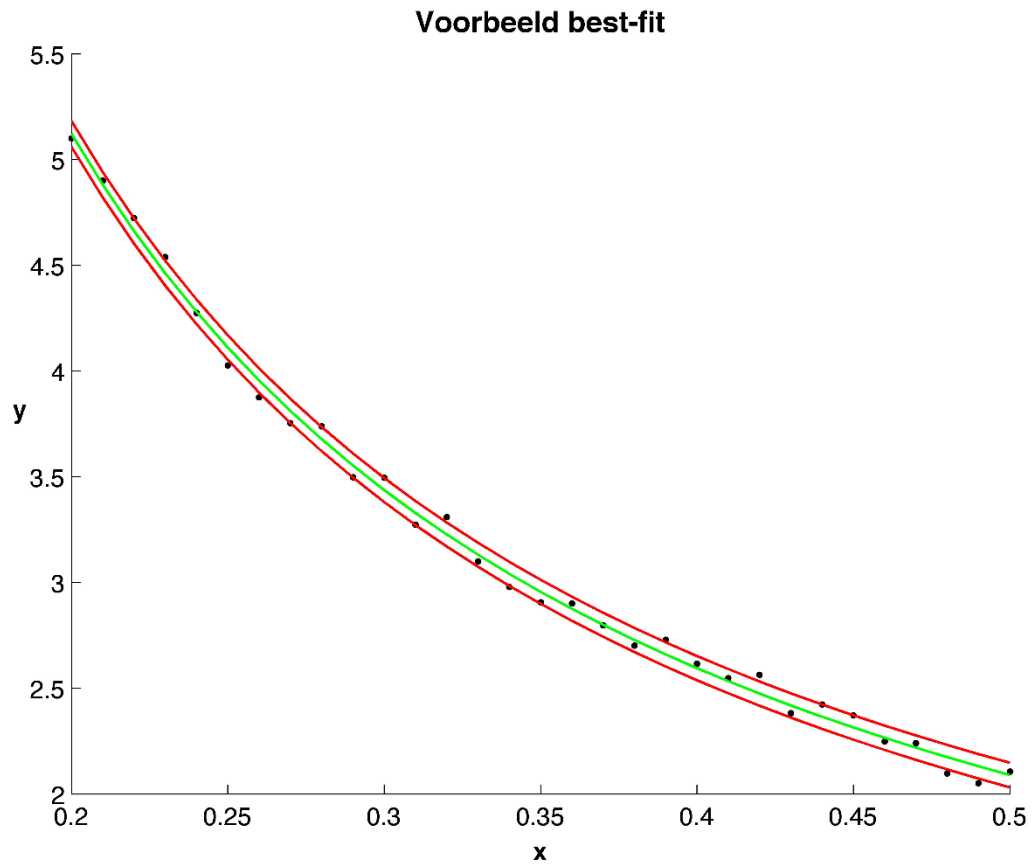
De keuze voor de grenzen van de graad van de polynoom is gebaseerd op de volgende laser vergelijking:

$$I = \frac{K\sigma}{R^4} \quad (2.6)$$

Bovenstaande vergelijking wordt bekomen door in de originele laser vergelijking [1] enkele parameters als constant te beschouwen. In (2.6) is K een constante en σ de werkzame doorsnede van de invallende laserbundel op het te meten object. Aangezien σ maximaal volgens een kwadraatswet van R afhangt, kan bijgevolg $1/I$ gemodelleerd worden volgens een polynoom met graad twee, drie of vier.

De keuze van het optimale model zal enerzijds gebaseerd zijn op de determinatiecoëfficiënt R^2 van de verschillende modellen. Dit getal geeft aan hoeveel procent van de datapunten verklaard kan worden door de variabiliteit van de parameters in het beschouwde model. De overige datapunten zijn dan te wijten aan een andere, onbekende en inherente variabiliteit. Een waarde voor R^2 gelijk aan 1 is dus het ideale geval. Daarnaast zal de beslissing ook gebeuren gebaseerd op de onzekerheid op de geschatte parameters van de modellen. Dit gebeurt aan de hand van een gemiddelde standaardafwijking σ . Deze wordt berekend uit Figuur 2.1 door het gemiddelde te nemen van de afstanden tussen de twee rode lijnen, die de

boven- en onderlimieten op de onzekerheid van de parameters voorstellen. De groene curve is de best-fit. Figuur 2.1 is slechts een voorbeeld van hoe de relevante figuren, die betrekking hebben op de werkelijke metingen, eruit zullen zien.



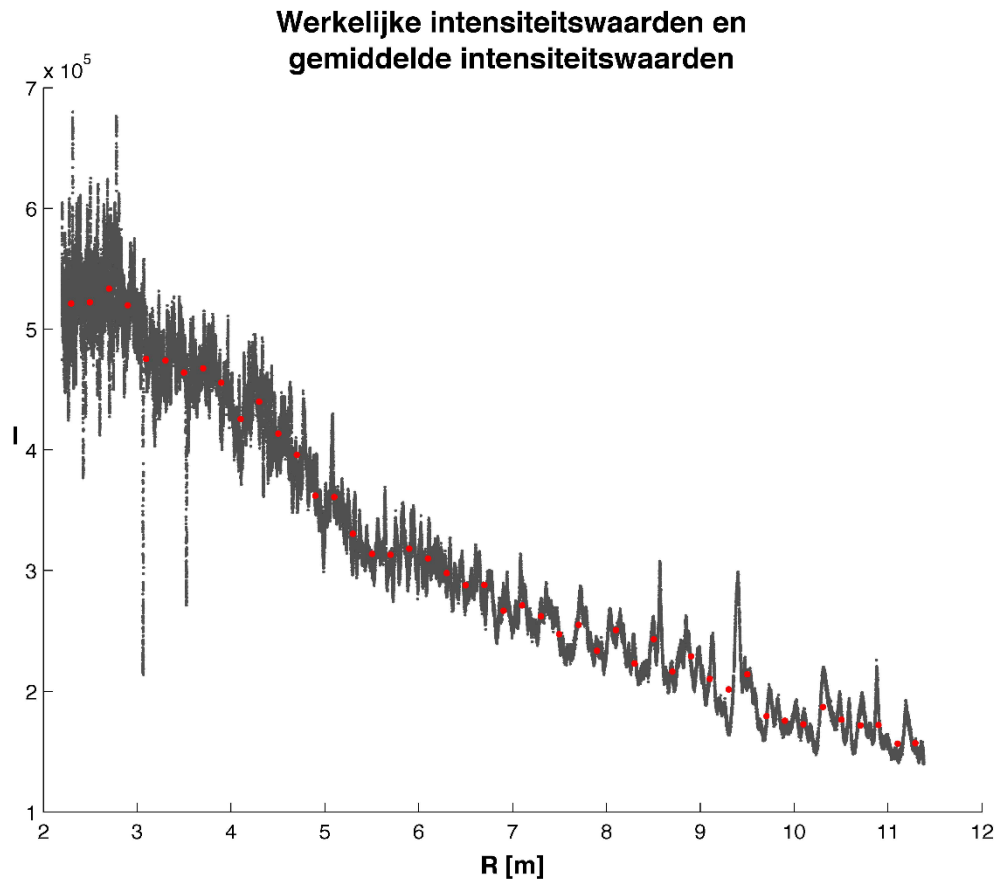
Figuur 2.1: Voorbeeld van een best-fit, gegeneerd voor randomwaarden die lichtjes afwijken van een $y=1/x$ -verband. De groene curve is de best-fit, de twee rode curves zijn de boven- en onderlimieten die resulteren uit de onzekerheid op de parameters.

3. Kalibratiemetingen

Vooreerst komen de kalibratiemetingen aan bod. Hierbij werd eenzelfde zandstrook onder vier verschillende omgevingsfactoren opgemeten, namelijk combinaties van droog/nat en vlak/reliëf. De datafits werden uitgevoerd op gemiddelde waarden van l en R in hun betreffende afstandsinterval. De intervallengte bedraagt hier 0.2 m. Het indelen van de data in zo'n intervallen zorgt ervoor dat ieder punt nu hetzelfde gewicht heeft bij het berekenen van de best-fit. Indien men met alle originele datapunten zou werken, zouden punten op kleinere afstanden een grotere impact hebben op het berekenen van de best-fit, aangezien de densiteit aan datapunten daar veel groter is dan bij grotere afstanden. Hoewel enige voorzichtigheid geboden wordt om met gemiddelde waarden te werken, bevestigt Figuur 3.1 dat dit hier toegelaten is. De gemiddelde waarden (rode punten) wijken namelijk niet al te veel af van de curve opgebouwd uit de opgemeten data. Het is net alsof er een (gewogen) sample uit de originele data werd genomen.

De determinatiecoëfficiënten en gemiddelde standaardafwijkingen bekomen bij de verschillende modellen worden weergegeven in Tabel 3.1. Een model wordt als optimaal ten opzichte van de andere

beschouwd, indien R^2 hoog is en σ klein. Voor de polynomen wordt gekeken indien hogere orde polynomen al dan niet een duidelijke verhoging van R^2 en een duidelijke vermindering van σ teweegbrengen. Is dit niet het geval, dan wordt de polynoom van de laagste orde als optimaal beschouwd.



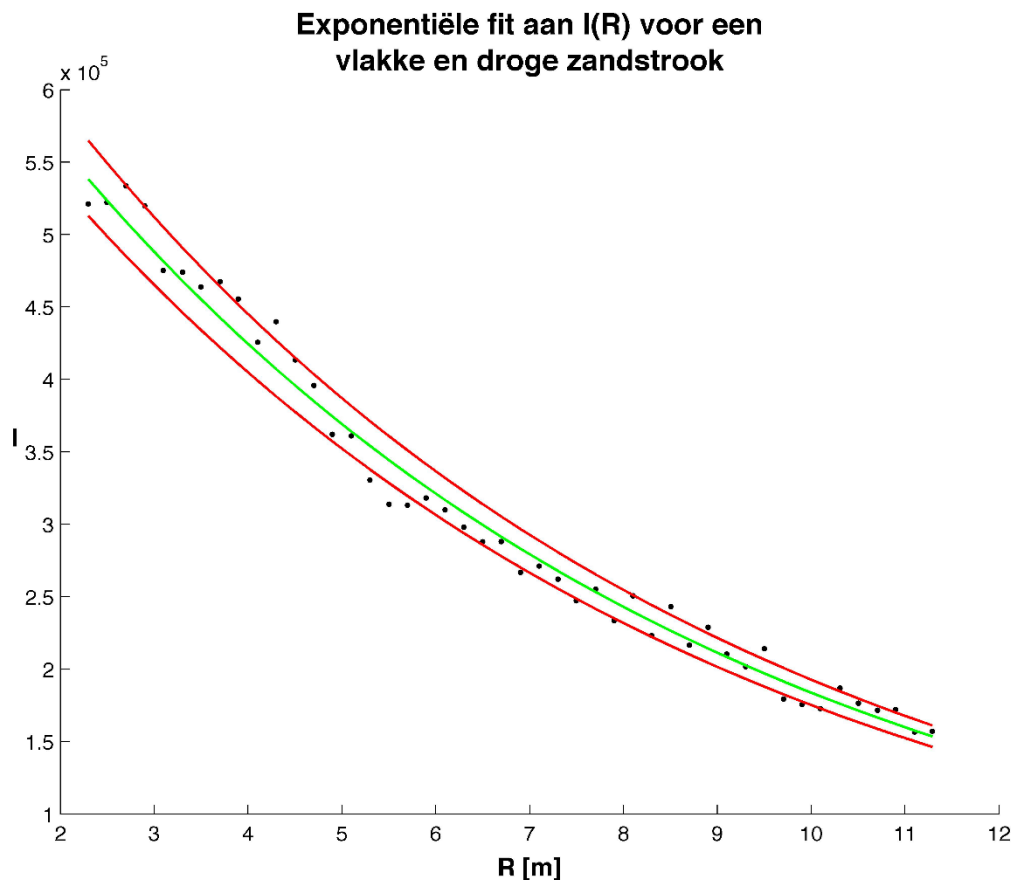
Figuur 3.1: Gemiddelde waarden (rood) en originele datapunten voor de droge en vlakke kalibratiestrook.

Tabel 3.1: R^2 -waarden en gemiddelde standaardafwijkingen voor de verschillende modellen op de kalibratiestroken. De twee beste modellen voor iedere strook worden telkens aangegeven in het geel.

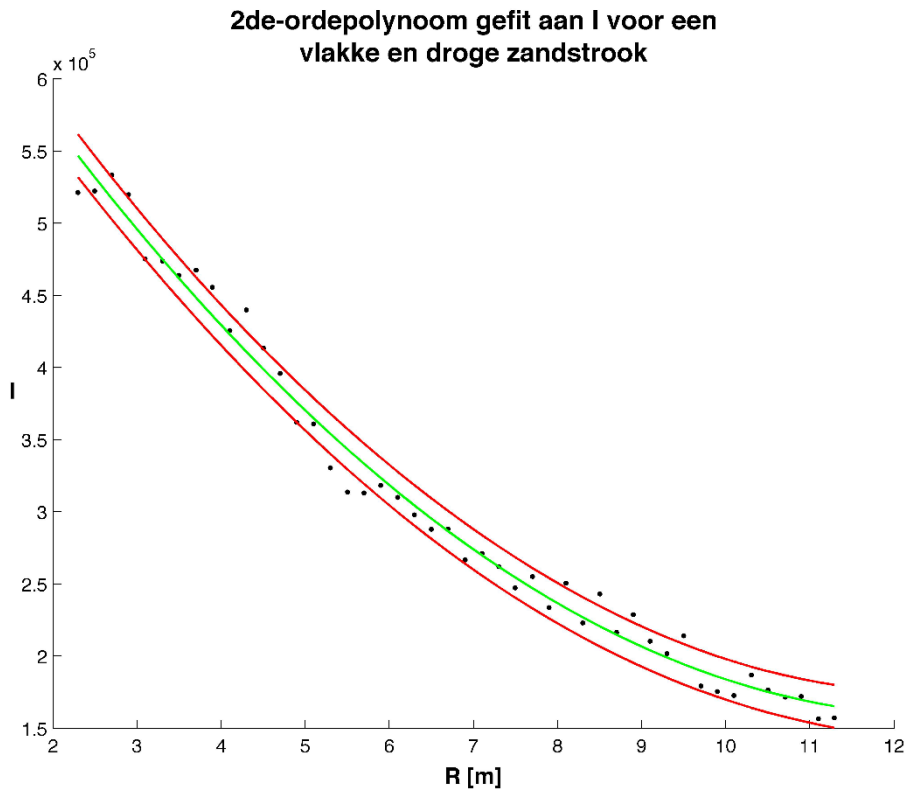
	exp	macht	log	$p_2(R)$	$p_3(R)$	$p_4(R)$	$1/p_2(R)$	$1/p_3(R)$	$1/p_4(R)$
droog en vlak									
R^2	0.985	0.934	0.984	0.987	0.987	0.989	0.987	0.985	0.990
σ	0.840	1.390	0.893	0.814	0.827	0.761	1.142	1.168	1.165
droog en ribbels									
R^2	0.975	0.919	0.973	0.977	0.977	0.979	0.976	0.976	0.980
σ	0.850	1.200	0.838	0.788	0.805	0.775	1.223	1.254	1.267
nat en vlak									
R^2	0.967	0.883	0.960	0.969	0.969	0.969	0.970	0.970	0.967
σ	0.815	1.231	0.799	0.723	0.737	0.748	1.286	1.316	1.345
nat en ribbels									
R^2	0.953	0.908	0.952	0.958	0.958	0.962	0.961	0.961	0.961
σ	0.883	1.002	0.844	0.801	0.817	0.794	1.270	1.279	1.310

De optimale best-fits worden in Tabel 3.1 geaccentueerd door een gele achtergrond. Het is duidelijk dat de keuze van het optimale model zal vallen op ofwel een exponentieel model of een tweede-ordepolynoom. Beide modellen liggen zeer dicht bij elkaar inzake determinatiecoëfficiënt en gemiddelde standaardafwijking, met iets betere waarden (hogere R^2 en lagere σ) voor $p_2(R)$. Het overschakelen van $p_2(R)$ naar hogere-ordepolynomen levert geen significant betere resultaten op, vandaar de keuze voor $k = 2$ voor $p_k(R)$. Hoewel het fitten van een polynoom aan $1/I$ de beste resultaten oplevert inzake R^2 , behoren de bijhorende σ 's tot de hoogste waarden. De onzekerheid op de parameters van het model is dus zeer groot. Daarnaast levert het logaritmisch model goede resultaten, maar het exponentiële model en $p_2(R)$ zijn net iets beter. Tot slot kan geconcludeerd worden dat $I(R)$ zich niet volgens een machtswet in R zal gedragen: lage R^2 -waarden en hoge σ 's ten opzichte van de andere modellen.

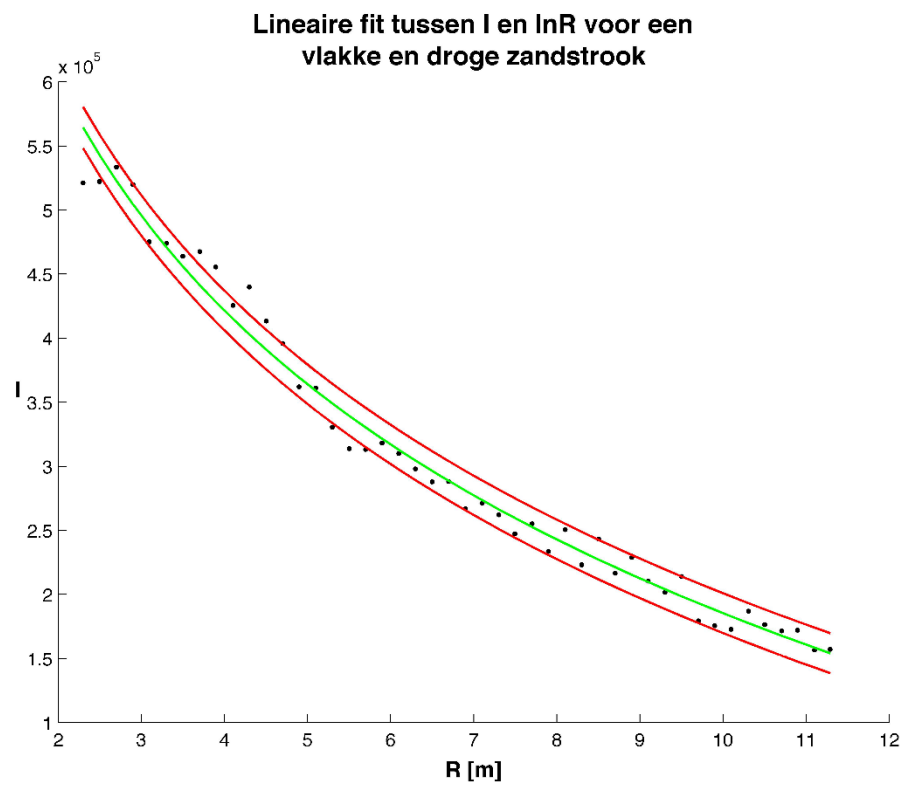
Figuur 3.2 toont gelijkaardige figuren als Figuur 2.1, maar ditmaal voor de vijf intrinsiek verschillende modellen voor $I(R)$ bij de droge en vlakke kalibratiestrook. Het exponentiële model (Figuur 3.2a) en de fit volgens $p_2(R)$ (Figuur 3.2b) zijn zeer gelijkaardig, maar hebben een iets ander gedrag in σ op de limieten. Ook de logaritmische fit neigt zeer sterk naar het $p_2(R)$ model (Figuur 3.2c). Tot slot illustreren Figuur 3.2d en Figuur 3.2e waarom deze fits minder goed zijn dan de andere. Indien men een tweede-ordepolynoom fit aan $1/I$, dan treden er zeer grote onzekerheden op in de parameters, voornamelijk bij kleinere afstanden. Hoewel de machtswet een goede fit lijkt te zijn voor $I(R)$ vanaf $R \approx 5$ m, wijken datapunten bij kleinere afstanden te veel af van de best-fit. Dit bevestigt dus de conclusies die werden getrokken uit Tabel 3.1.



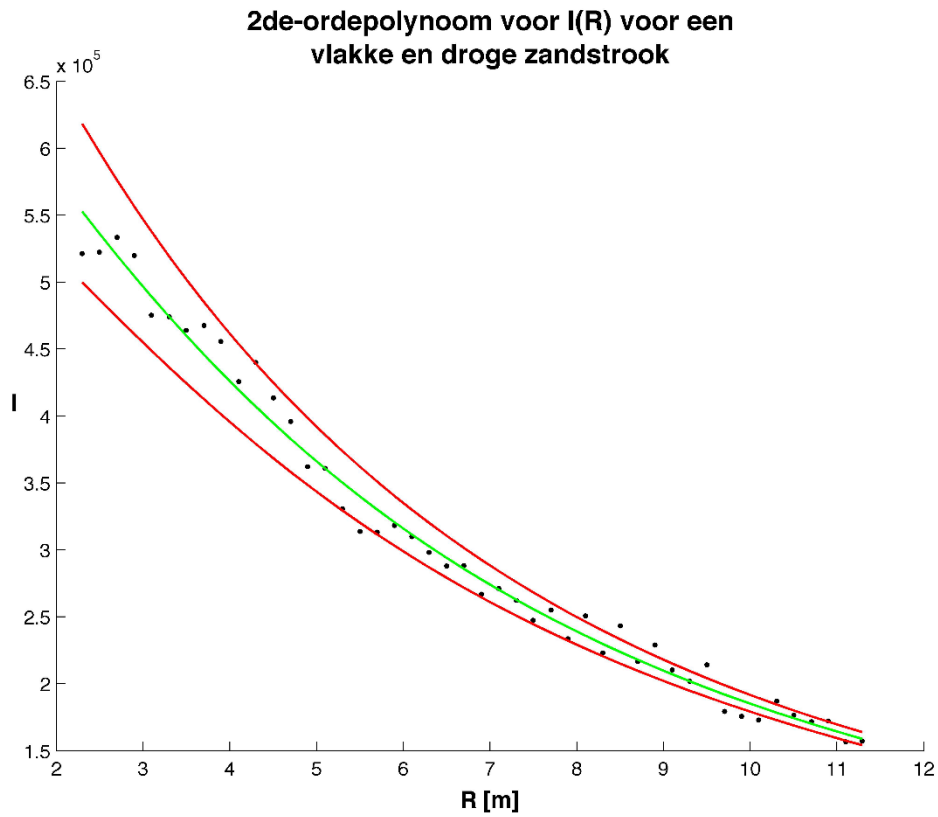
Figuur 3.2(a): Exponentiële fit aan $I(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte.



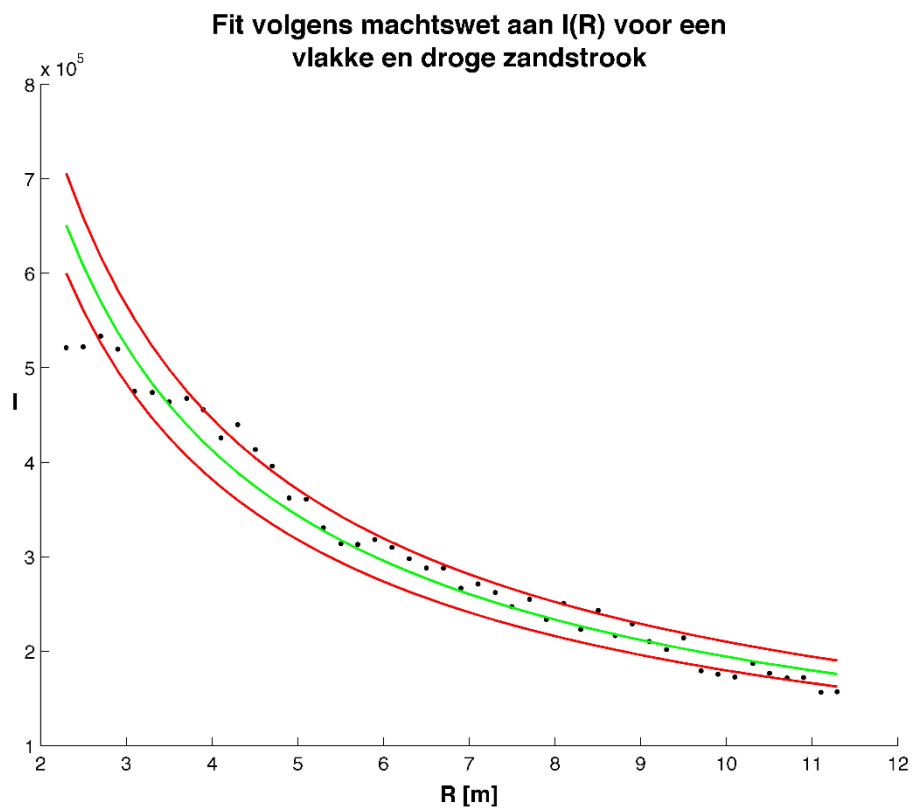
Figuur 3.2(b): $p_2(R)$ -fit aan $I(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte.



Figuur 3.2(c): Logaritmische fit aan $I(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte.



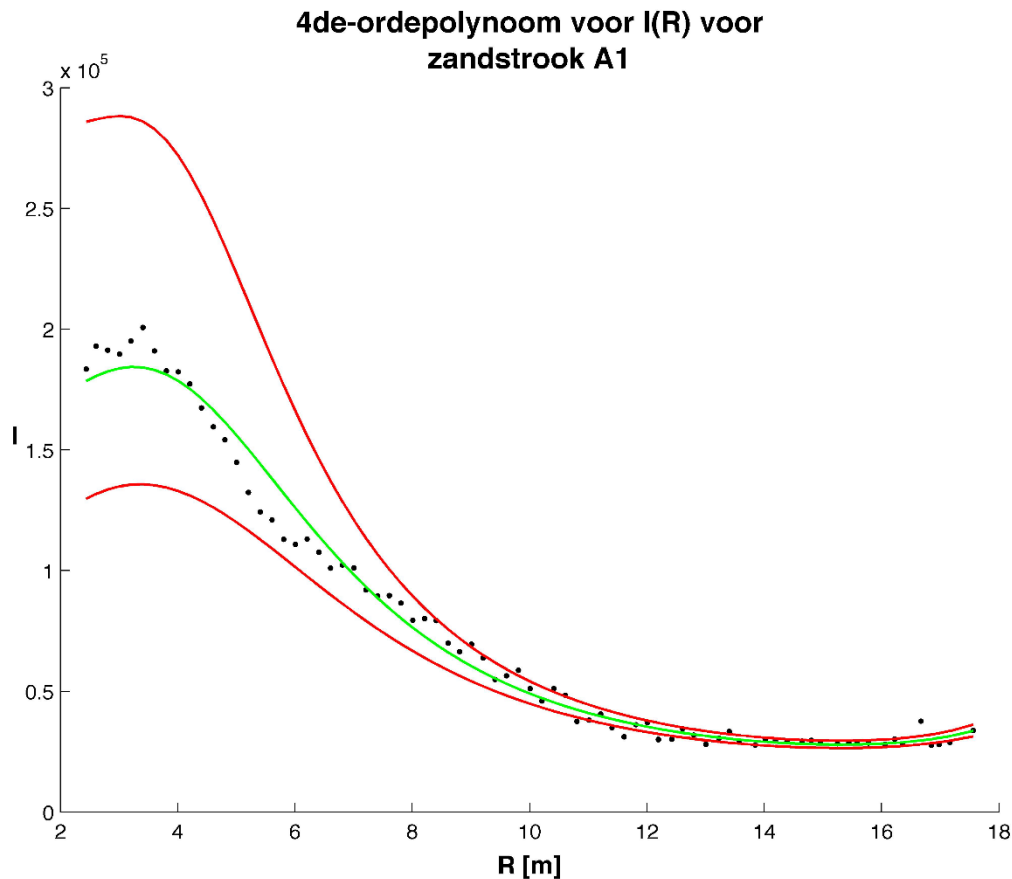
Figuur 3.2(d): $p_2(R)$ -fit aan $(1/I)(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte.



Figuur 3.2(e): Fit volgens machtswet aan $I(R)$ voor een vlakke en droge zandstrook in de kalibratieruimte.

4. Strandmetingen

Nu wordt er nog eens nagegaan of bovenstaande conclusies betreffende de best-fits ook kunnen getrokken worden voor enkele strandmetingen. Er wordt een strook dichtbij de dijk (A1), een halverwege de dijk en het water (A27), een aan het water (preA36) en een parallel aan een golfbreker (XB2) beschouwd. Tabel 4.1 vat de bekomen resultaten samen. Hierbij werden geen polynomiale fits meer uitgevoerd aan $1/l$, aangezien de σ 's veel te groot waren bij de kalibratiemetingen. Figuur 4.1 illustreert dat dit hier bij de standmetingen ook het geval zou zijn.

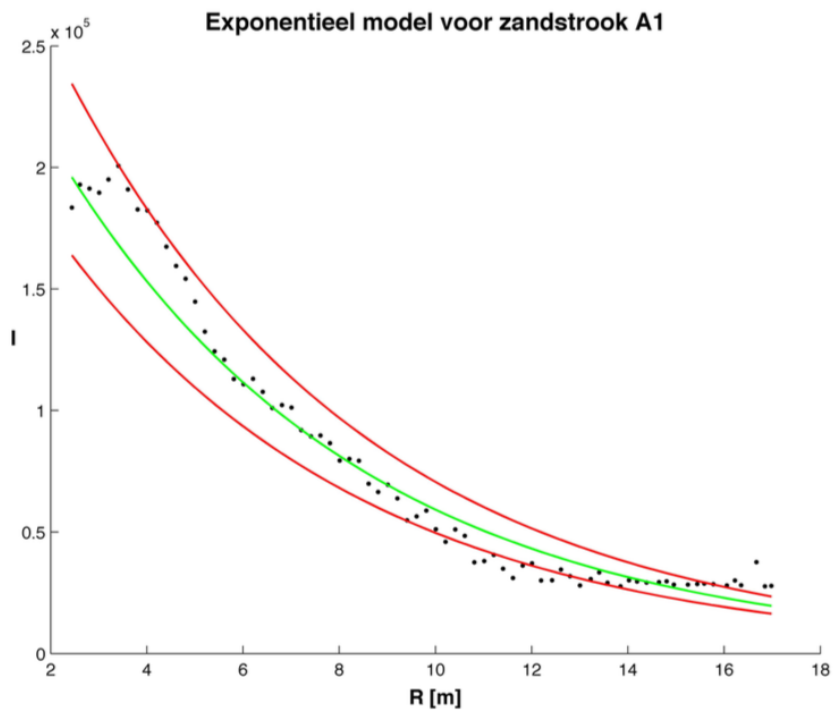


Figuur 4.1: $p_4(R)$ -fit aan $1/l$ voor zandstrook A1.

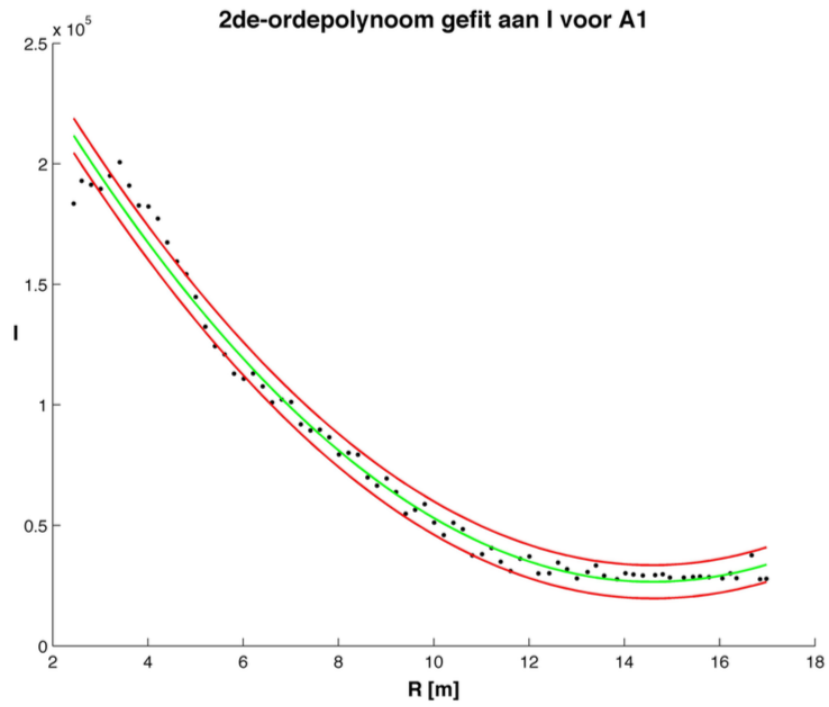
Tabel 4.1 toont aan dat voor de strandmetingen een tweede-ordepolynoom als fit aan $l(R)$ de beste resultaten oplevert. Terwijl bij de kalibratiemetingen het exponentiële model en $p_2(R)$ zeer gelijkaardige resultaten inzake R^2 en σ opleverden, is dit hier nu niet meer het geval; zowel R^2 ligt bij het exponentiële model duidelijk lager en σ beduidend hoger dan bij $p_2(R)$. Figuur 4.2 illustreert de vier intrinsiek verschillende modellen voor de strook A1. Op basis hiervan wordt bovenstaande conclusie nogmaals bevestigd.

Tabel 4.1: R^2 -waarden en gemiddelde standaardafwijkingen voor de verschillende modellen voor enkele strandmetingen. Het beste model voor iedere strook wordt telkens aangegeven in het geel.

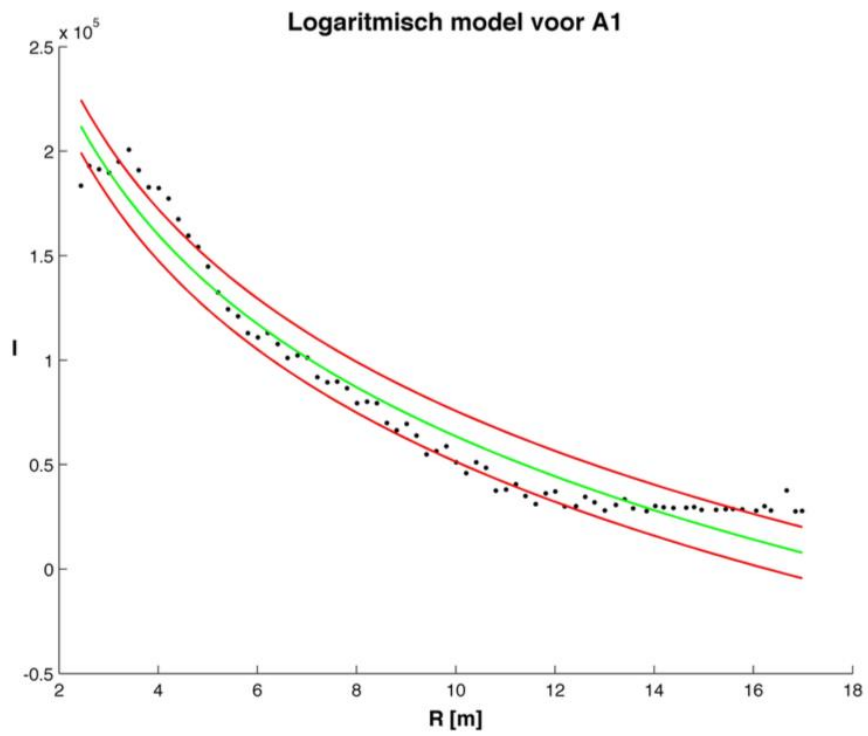
	exp	macht	log	$p_2(R)$	$p_3(R)$	$p_4(R)$
A1						
R^2	0.962	0.820	0.956	0.986	0.986	0.989
σ	1.371	1.384	1.219	0.691	0.698	0.638
A27						
R^2	0.939	0.966	0.966	0.988	0.990	0.990
σ	1.627	1.054	1.222	0.733	0.678	0.686
preA36						
R^2	0.864	0.957	0.934	0.966	0.969	0.976
σ	1.547	0.963	1.131	0.827	0.805	0.726
XB2						
R^2	0.710	0.826	0.796	0.920	0.925	0.936
σ	1.468	1.196	1.166	0.744	0.734	0.692



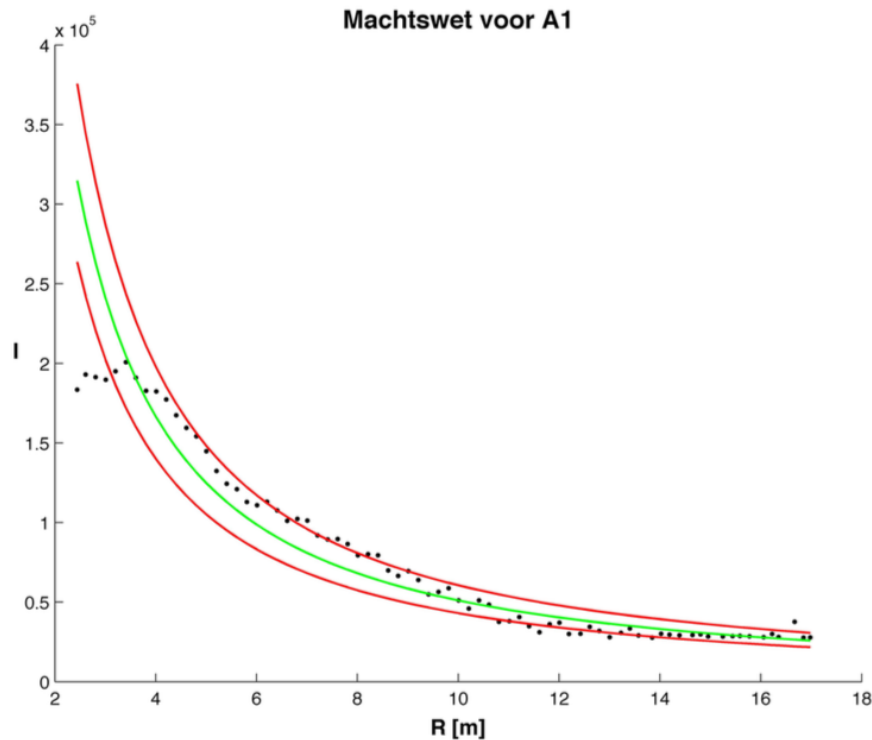
Figuur 4.2(a): Exponentiële fit aan $I(R)$ voor zandstrook A1.



Figuur 4.2(b): 2^e-ordepolynoom als fit aan $I(R)$ voor zandstrook A1.



Figuur 4.2(c): Logaritmische fit aan $I(R)$ voor zandstrook A1.



Figuur 4.2(d): Fit volgens machtswet aan $I(R)$ voor zandstrook A1.

5. Besluit

Voorgaande beschreef een procedure om de afstandafhankelijke en materiaalafhankelijke componenten van backscatter waarden weg te werken, zodat er enkel nog een afhankelijkheid is van de invalshoek. Hoewel er geen wiskundige uitdrukking voor de materiaalafhankelijke parameters gezocht werd, zit hun afhankelijkheid in de gezochte fitconstanten bij de fits op $I(R)$. Op deze manier is het mogelijk om via intensiteitskaarten geometrische informatie te visualiseren.

Op basis van de metingen in de kalibratieruimte kon niet meteen een eenduidige conclusie getrokken worden welk wiskundig verband optimaal $I(R)$ beschrijft. Het exponentiële model en de tweede-ordepolynoomfit leveren zeer gelijkaardige resultaten op inzake determinatiecoëfficiënt R^2 en gemiddelde standaardafwijking σ . Ook de strandmetingen leveren gelijkaardige resultaten op voor het exponentiële model en de 2^{de} orde polynoom, waarbij de standaarddeviaties bij het laatstgenoemde model het kleinst zijn. Toch wordt omwille van het fysisch logischer te verklaren aspect voor het exponentiële model geopteerd. De backscatter wordt dus optimaal weergegeven door $I(R)=ae^{bR}$, waarbij a een positieve constante is en b een negatieve fitparameter. Bij de kalibratiestrook leverde dit waarden op van $6.7 \cdot 10^6$ voor a en -0.13 voor b .

6. Referenties

- [1] S. Kaasalainen, A. Jaakkola, M. Kaasalainen, A. Krooks, and A. Kukko. Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sensing*, 3:2207–2221, 2011. DOI: 10.3390/rs3102207.