



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

NAUTISCHE FACULTEIT

Bathymetrische studie project Burchtse Weel

Jiri Picart

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen

Promotor: Kapt. Axel Annaert

academiejaar: 2019-2020



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

NAUTISCHE FACULTEIT

Bathymetrische studie project Burchtse Weel

Jiri Picart

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen

Promotor: Kapt. Axel Annaert

academiejaar: 2019-2020

Woord vooraf

Deze masterproef vormt de afsluiter van mijn studie Nautische Wetenschappen, een studie waarvan ik blij ben dat ik ze destijds heb aangevat. Hetzelfde kan gezegd worden over de bathymetrische studie van het Burchtse Weel, waarbij ik initiëel niet wist wat te verwachten van de studie. Gaandeweg bleek het een zeer interessant leerproces te zijn. Hoe meer ik bekend raakte met de achterliggende theoriën en technieken, des te meer mijn interesse in het onderwerp werd aangewakkerd.

Hoewel niet alles volgens plan verliep, maakte de verhouding theoretische achtergrond versus het praktisch onderzoek van deze studie een aangename leerschool in de bathymetrie. Dermate dat ik na mijn studies wil verdergaan in deze sector.

Voor het afwerken van deze masterproef kon ik rekenen op de hulp en bijdrage van enkele mensen, die ik wil bedanken. Ten eerste mijn promotor, Kapt. Axel Annaert, voor het voorrecht om onrechtstreeks mee te mogen werken aan zijn doctoraatsstudie en om te allen tijde beschikbaar te zijn voor begeleiding en feedback. Verder zou ik graag enkele bedrijven bedanken die een bijdrage hebben geleverd om deze masterproef mogelijk te maken. DEME Group, om ons initiëel te voorzien van meetapparatuur. Daarnaast De Vlaamse Waterweg NV, om de data te voorzien waarrond een heel deel van deze masterproef is gevormd. Tot slot in het bijzonder mijn vriend Christophe K., voor het voorzien van indrukwekkende dronebeelden die voor een extra dimensie van het eindresultaat hebben gezorgd. Ik hoop dat mijn interesse in het onderwerp en de tijd die erin geïnvesteerd is zich laten zien in deze masterproef en het lezen ervan eveneens interessant verloopt.

Samenvatting

Het doel van deze masterproef bestaat erin aan de hand van praktisch onderzoek in het vakgebied bathymetrie, onderzoek te verrichten naar de invloed van de getijdenwerking op het natuurgebied Burchtse Weel. Het praktisch onderzoek wordt verwezenlijkt door de verwerking van hoogtemetingen, waarmee aan de hand van volumeberekeningen een beeld geschetst wordt van de sedimentatie die plaatsvindt in het Burchtse Weel. De resultaten van de volumetrische groei over een periode van zeven jaar worden geanalyseerd aan de hand van vroegere sedimentbalansen en nieuwe sedimentstrategieën voor de Beneden-Zeeschelde. De waargenomen alteraties in het volume worden enerzijds verklaard door bevindingen omtrent de hogere graad van erosie van slib in ondiepe wateren, gelinkt aan de ingang van de getijpoorten. Het netto positief transport van Scheldeslib richting de Beneden-Zeeschelde, geobserveerd in de sedimentbalansen, is ook een onderzochte factor in de studie alsook de slibconcentratie op variërende dieptes in de Schelde. Anderzijds kan gesteld worden, relatief aan de voorziene cijfers, dat de toegenomen bagger- en stortactiviteiten ter onderhoud van de Beneden-Zeeschelde mogelijk een invloed uitoefenen op het afzetten van sediment. Ondanks het feit dat de sedimentatie aan hoog tempo verloopt, is het Burchtse Weel in diezelfde periode getransformeerd tot een unieke biotoop die fungeert als rustoord voor de vele vogels die er vandaag neerstrijken.

Abstract

The goal of this thesis is to conduct practical research in the field of bathymetry regarding the influence of the tides into the nature reserve Burchtse Weel. The research is conducted by processing height measurements, in their turn used to calculate volumetric changes to provide a clear picture regarding sedimentation in the Burchtse Weel. The results of the volumetric development, spanning a period of seven years, are analysed using former sedimentation balances and more recent sedimentation strategies developed for the Lower-Zeescheldt. The observed volumetric growth is, on the one hand, clarified by findings regarding the higher grade of erosion of sludge in shallow waters, related to the entrance of the tidal gates. The net positive transport of sludge in the direction of the Lower-Zeescheldt, observed in the sedimentation balances, is also a plausible factor regarding this research. On the other hand, it's stated that, relative to the obtained data, that the rise in dredging activities conducted for maintenance of the Lower-Zeescheldt are likely influencing the occurring sedimentation. Despite the fact that the sedimentation is proceeding at a rapid pace, the Burchtse Weel during these years has transformed into a unique biotope that serves as a refuge for the many bird species which choose to perch there.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	i
Samenvatting.....	iii
Abstract.....	v
Lijst van figuren	ix
Lijst van tabellen	xi
1 Inleiding	1
2 Geschiedenis.....	3
3 Bathymetrie	9
3.1 Echo sounder	9
3.1.1 Geluid	10
3.1.1.1 Amplitude	11
3.1.1.2 Golfvorm.....	11
3.1.1.3 Frequentie.....	11
3.1.2 Singlebeam echo sounder	13
3.1.3 Multi-channel echo sounder	15
3.1.4 Multibeam echosounder.....	16
3.2 Motion reference unit	17
3.3 Propagatie van geluidsgolven	18
3.3.1 Sound Velocity Probe	20
3.4 LiDAR.....	21
3.4.1 Intensiteit.....	24
3.4.2 Refractie.....	25
3.4.3 Dataverwerking	27
4 Hydrotrac II	31
4.1 Transducer.....	32
4.2 Bar check kalibratie.....	33
5 GPS	35

5.1	RTK- dGPS	36
6	Praktische voorbereidingen	41
7	Qinsy	43
7.1	Geodetisch coördinatensysteem.....	43
7.1.1	Referentie-ellipsoïde	44
7.1.2	Hoogtereferen tie	47
7.2	Delaunay Triangulatie.....	48
7.3	Sounding grids	51
8	Resultaten	65
9	Conclusies	75
10	Bibliografie	77
	Lijst van bijlagen	85
	Bijlagen	87

Lijst van figuren

Figuur 1	Frickx kaart	3
Figuur 2	Popp kaart.....	4
Figuur 3	Slikken en schorren op het Burchtse Weel.....	5
Figuur 4	Inrichtingsschets Burchtse Weel	6
Figuur 5	Metten van hellingen met een SBES.....	14
Figuur 6	Kritische diepte van een multichannel echo sounder.....	15
Figuur 7	Voorbeeld patch test	17
Figuur 8	Sound velocity profile.....	19
Figuur 9	LiDAR principe.....	23
Figuur 10	Refractie LiDAR	26
Figuur 11	Puntendichtheid LiDAR data	29
Figuur 12	2D trilateratie van een GPS-systeem.....	37
Figuur 13	FLEPOS	39
Figuur 14	Satellietfoto locatie	41
Figuur 15	Opstelling matten	42
Figuur 16	GRS80 vs. Hayford	45
Figuur 17	Verband tussen geoïde en ellipsoïde.....	47
Figuur 18	Sounding Grid 2011	51
Figuur 19	Sounding Grid 2012	53
Figuur 20	SET metingen.....	54
Figuur 21	Sounding Grid 2013	56
Figuur 22	Sounding Grid 2014	57
Figuur 23	Sounding Grid 2015	59
Figuur 24	Sounding Grid 2016	60

Figuur 25	Sounding Grid 2017	61
Figuur 26	Sounding Grid 2018	62
Figuur 27	Jaarlijkse storthoeveelheden Schelde	71
Figuur 28	Gegevens meetpalen Burchtse Weel.....	73

Lijst van tabellen

Tabel 1	Vergelijking GPS & dGPS.....	36
Tabel 2	Vergelijking referentie-ellipsoïdes	45
Tabel 3	Zeven-parametersysteem	46
Tabel 4	Resultaten Sounding Grids	65

1 Inleiding

Iedereen in de maritieme wereld ,en ook daarbuiten, heeft baat bij bathymetrische studies, die globaal een breed toepassingsgebied kennen dat voor velen nog relatief onbekend terrein is. De bathymetrische studie van het Burchtse Weel dient als onderzoek naar de sedimentatie ten gevolge van de getijden van de Schelde, waarmee het Burchtse Weel in verbinding staat. Door data over een langdurige periode te benutten kan de invloed van de getijden in deze unieke biotoop op kleinere schaal onderzocht worden. Centraal hierin staat het tempo waaronder het afzetten van sediment verloopt, onderzoek naar mogelijke factoren en de samenstelling van het sediment.

De studie wordt aangevat met een korte geschiedenis rond het ontstaan en heraanleggen van het Burchtse Weel, gevolgd door theoretische achtergrond om het begrip bathymetrie vorm te geven alsook de benodigde technieken en systemen. Hieraan is een praktische studie gekoppeld op basis van verzamelde meetpunten over meerdere jaren, waarna aan de hand van volumeberekeningen een beeld wordt geschetst van de sedimentatie. Deze resultaten worden verder getoetst aan eerdere bevindingen in dit vakgebied met mogelijke verklaringen over de evolutie van de biotoop.

2 Geschiedenis

De geschiedenis van het Burchtse Weel blijft grotendeels gehuld in mysterie, volgens Natuurpunt ooit gevormd door een dijkdoorbraak. Aan de hand van een oude Frickx kaart is duidelijk dat er een plas werd gevormd omstreeks 1712, linksonder te zien op figuur 1.



Figuur 1 Frickx kaart

(Bron: verwerkt van '<https://www.geopunt.be/>', z.d.)

Verdere ontwikkeling is te zien op een Ferraris kaart uit 1777, waar gesproken wordt over het "Grooten Weel", dat tevens niet verbonden lijkt te zijn met de Schelde en destijds vermoedelijk onafhankelijk was van getijdenwerking. Ook vele malen groter en anders van vorm dan voorheen blijft het Weel hetzelfde tot het einde van de 19^{de} eeuw, meerbepaald rond 1842-1879, zoals te zien is op figuur 2. Hier onder de naam "de Grootte Burchtsche Weel".



Figuur 2 Popp kaart

(Bron: verwerkt van '<https://www.geopunt.be/>', z.d.)

Rond 1965 werd een aanpalend dok gegraven om vijf prefab elementen voor de Kennedytunnel te bouwen. In 2011 zijn het Weel en aanpalend dok heraangelegd tot slikken- en schorregebied voor de talrijke vogels die in het gebied neerstrijken. Dit werd gedaan ter compensatie van de natuurschade veroorzaakt door de aanleg van de Oosterweelverbinding. ('Natuurwandeling Burchtse Weel', z.d.) In 2012 werd de laatste hand gelegd aan de afwerking van het vernieuwde Burchtse Weel. Toen pas bleek dat de historische vervuiling van vroegere fabrieken die afval loodsten in de Laarbeek, een nabijgelegen kleine waterloop, veel groter was dan verwacht. Hierdoor liet de getijdenwerking van het Weel nog op zich wachten sinds het sluiten van de sluisdeuren het jaar voorheen.

Tijdens de drie jaar durende werken voor de heraanlegging, die werden aangevat in 2008, werd 70 procent van het Burchtse Weel ontdaan van vervuild sediment dat risico's inhield voor mens, fauna en flora. Door een korte getijdenwerking in 2011 kon een grote hoeveelheid sediment uit de Schelde zich afzetten op het vervuilde deel, waarna onderzoek werd uitgevoerd om te bepalen of dit stabiel genoeg was om de aanwezige

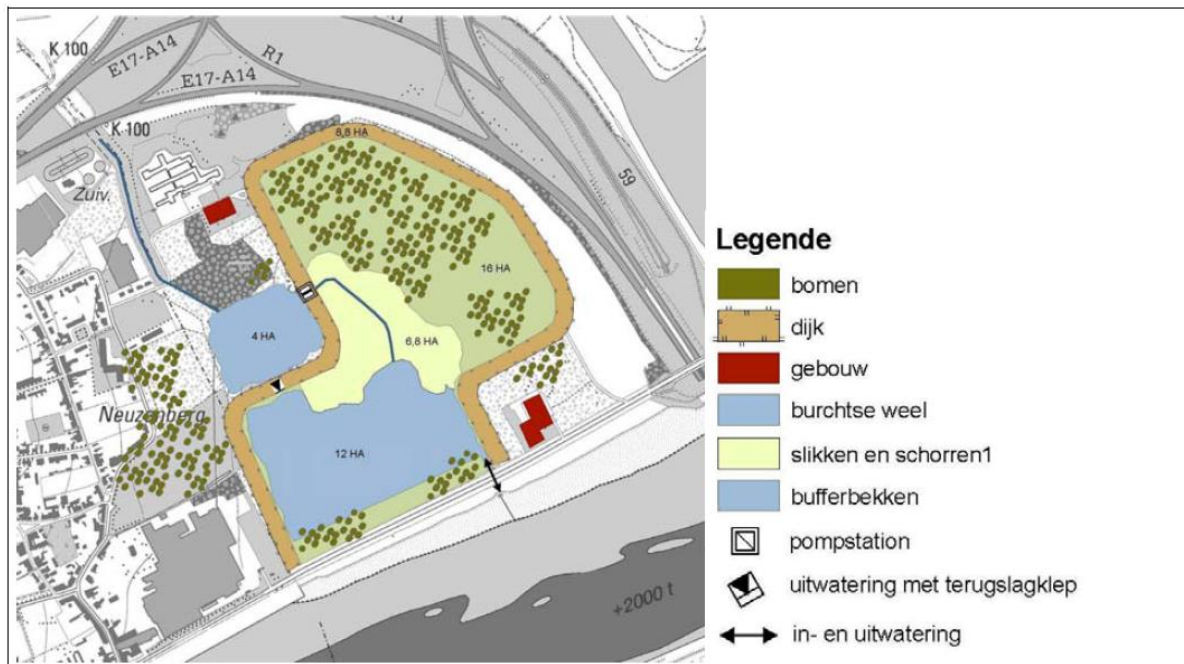
vervuiling te isoleren. Desondanks waren er tijdens deze ontwikkelingen al talrijke vogels aanwezig op en rond het Burchtse Weel. De Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij besliste na het onderzoek dat de laag voldoende isoleert en er geen gevaar is voor het milieu en de instandhouding van de biotoop. ('Opnieuw getijdenwerking in Burchtse Weel', 2013)



Figuur 3 Slikken en schorren op het Burchtse Weel
(Bron: eigen afbeelding)

Sinds 2013 heerst de getijdenwerking weer over het gebied, waardoor we wederom van een effectief slikken- en schorregebied kunnen spreken. En het is net deze getijdenwerking die verantwoordelijk is voor het ontstaan van een zeer rijke biotoop. In de slikken vinden we vele kleine organismen en dieren terug die als voeding dienen voor de talrijke vogelsoorten. Slikken overspoelen bij elke vloed, waardoor er buiten de aanwezige kleine dieren zoals wormen, krabben en rivierkreeftjes normaal niet veel planten aanwezig zijn. Schorren aan de andere hand overstromen enkel bij springtij en ontstaan doordat er bij elke getijdenwisseling sediment vanuit de Schelde wordt afgezet, wat op bepaalde plaatsen begint op te hopen en leidt tot regio's die droog komen te liggen. Er treedt ook erosie op waardoor er geulen ontstaan waarin het water wegloopt. Het is net deze combinatie van getijdenwerking, overgang van zout en zoet water

plus de werking van het sediment, wat deze unieke biotoop maakt tot wat het is. (INBO, z.d.; 'Opnieuw getijdenwerking in Burchtse Weel', 2013)



Figuur 4 Inrichtingsschets Burchtse Weel

(Bron: 'GRUP Oosterweelverbinding toelichtingsnota—Inrichtingsschets Burchtse Weel', 2006)

Bovenstaande goedgekeurde inrichtingsschets van 2006 door de stad Antwerpen geeft een ruw overzicht van de indeling van het Weel. Achter het Weel heeft men nog een bufferbekken aangelegd. Dit om de afwatering van de Laarbeek, een nabijgelegen kleinere waterloop, te verzekeren. Bij stormvloed of langdurige periodes van neerslag kan het water in de hoofdrievieren namelijk zo hoog staan, dat dit stroomopwaarts voor wateroverlast zorgt. De afwatering uit het bufferbekken geschiedt enerzijds door gravitaire afwatering met een terugslagklep, zodat afwatering tijdens de vloedstand onmogelijk wordt. Voor een grotere afvoer van water benuttigt men pompen noordelijker gelegen in het Burchtse Weel, aangeduid op de schets. Het verschil tussen de inrichtingsschets en de realiteit ligt in de locatie van de getijpoorten, die meer zuidwestelijk georiënteerd zijn dan op de schets. De in- en uitwatering aangeduid op de figuur is vervangen door uitwatering met een

terugslagklep. Onder beleid van de dienst Integraal Waterbeleid wordt een pompstation uitgebaat met vier pompen die een totale maximale capaciteit van 3000 liter per seconde bezitten. (Ronsyn, 2015; Smolders, Plancke, & Mostaert, 2019)

3 Bathymetrie

Bathymetrie definiëert zich als het opmeten van de hoogte van de zee- of rivierbodem met als doel deze in kaart te brengen. Om deze reden wordt bathymetrie vaak gezien als het onderwaterequivalent van topografie, dat een breedtoepassingsgebied kent. Één van de belangrijkste is het opstellen van nautische kaarten voor navigatiedoeleinden. Allerlei andere sectoren, gaande van de offshore tot surveys voor baggeroperaties, hanteren ook bathymetrische studies om hun werk mogelijk te maken. Hierbij worden o.a. dieptelijnen en het kleurenspectrum aangewend om een visuele representatie te geven van de bodem. Bathymetrie is een tak van het bredere begrip hydrografie. (NOAA, 2018)

De bathymetrische studie van het Burchtse Weel verloopt in verschillende stadia die in deze masterproef aan bod komen, alsook de gebruikte technieken en achterliggende theoriën. De effectieve voorbereidingen van het onderzoek en de verwerking van de verkregen data zullen het meeste tijd in beslag nemen, om er zeker van zijn dat alles optimaal functioneert en we betrouwbare metingen kunnen produceren. Het hele project en de gebruikte werkwijzen vallen onder de bathymetrie, met behulp van een echo sounder (echolood) en hoogtemetingen verkregen door een LiDAR survey. De gegevens verkregen door de metingen worden vervolgens verwerkt met de software Qinsy en gelinkt aan de GPS-coördinaten van een RTK-dGPS. De meest frequent gehanteerde systemen en de principiële werking ervan worden aangehaald alvorens in detail in te gaan op het gebruikte materiaal voor de bathymetrische studie van het Burchtse Weel.

3.1 Echo sounder

Vroeger werd om de lokale diepte te bepalen een hand-of dieplood gebruikt, bestaande uit een loden cilinder die aan een touw gehangen werd, voorzien van merktekens om de diepte af te lezen. De cilinder was

aan de onderkant voorzien van een uitsparing, die zich bij contact met de bodem vulde met bodemmateriaal. Dit zou voor hedendaagse doeleinden zeer inaccuraat zijn en onvolledige resultaten produceren. Bij lokale dieptemetingen worden obstakels en ondieptes over het hoofd gezien, wat niet voldoet aan de hedendaagse standaarden van bathymetrie. Na enige progressie op het vlak van dieptemetingen werd de echo sonder ontwikkeld, die de propagatie van geluidsgolven in water benut. (Oosthoek 1916, 2018)

3.1.1 Geluid

Een echo sonder maakt gebruik van geluidsgolven die via een transducer, een omvormer tussen geluid en elektrische signalen, worden uitgezonden naar de zeebodem. De weerkaatste golven worden vervolgens ontvangen na weerkaatsing met de bodem. Door het meten van de tijd tussen zenden en ontvangen van de golven, kan de diepte volgens van der Velden e.a (2012) bepaald worden door:

$$d = \frac{1}{2} (v \cdot t)$$

t [s] = de tijd tussen zenden en ontvangen

v [m/s]= de propagatie of snelheid van de geluidsgolven

d [m]= de waterdiepte

Bijna alle gebruikte detectiesystemen die aangewend worden voor bathymetrische projecten maken gebruik van geluidsgolven. Geluidsgolven zijn longitudinale golven, wat inhoudt dat de individuele golfdeeltjes zich parallel verplaatsen met de bewegingsrichting van de golf. De energie die de golf omvat volgt steevast één richting, terwijl de moleculen van het medium in beide richtingen verplaatsen. De energie wordt doorgegeven tussen aangrenzende moleculen van het medium. Eens de geluidsgolf gepasseerd is, blijven de moleculen in ruwweg

dezelfde positie. Geluid op zich kan beschreven worden door drie karakteristieken: amplitude, golfvorm en frequentie. (van der Velden e.a., 2012, hfdst. 1)

3.1.1.1 Amplitude

De amplitude omschrijft "hoe luid" een bepaald geluid is. Om de amplitude weer te geven wordt een logaritmische schaal, de decibel, gehanteerd. De amplitude is afhankelijk van de compressie of verdunning van het medium, en wordt o.a. beschreven door de afstand tussen de moleculen waar het medium wordt samengedrukt door de golf. Bovendien werkt de decibelschaal niet hetzelfde in elk medium. Een geluid van 150 decibel in water is niet hetzelfde als een geluid van 150 decibel in lucht, omdat in lucht en water een ander referentieniveau werd geselecteerd aangepast aan de gevoeligheid van het menselijk gehoord. Voor hydrografisch onderzoek wordt gewerkt rond $\pm 205\text{-}235$ dB. (Brainard, 2020; Nieu Kirk, 2015; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 1)

3.1.1.2 Golfvorm

De golfvorm beschrijft de karakteristiek van de golf, die bepaald wordt voor de beoogde doelstellingen. Voor alle echosounders geldt dat de golfvorm enkel te controleren valt door de constructiemethode. Eens in werking valt de golfvorm niet meer te wijzigen, op ontwerpinstellingen na. (van der Velden e.a., 2012, hfdst. 1)

3.1.1.3 Frequentie

De frequentie van geluidsgolven omschrijft het aantal golven die een vast punt passeren per tijdseenheid. De bepaling van de frequentie wordt door van der Velden e.a (2012) als volgt beschreven:

$$f = \frac{1}{T}$$

f [Hz] = frequentie

T [s] = periode waarin gemeten wordt

De frequentie is een configureerbare eenheid in echo sounders, onafhankelijk van het gebruikte medium. De selectie van de correcte werkfrequentie voor elk bathymetrisch project is cruciaal om de gewenste resultaten te verkrijgen. De keuze van de werkfrequentie berust op enkele factoren:

Bodemreflectie/penetratie: een hoge frequentie reflecteert op de zanderige bodem en is bijgevolg geschikt voor bathymetrische studies met als doel de bodem in kaart brengen. Een lage frequentie penetreert de laag zand op de bodem en kan toegepast worden voor sedimentologisch onderzoek naar bijvoorbeeld olie en mineralen of de samenstelling van de bodem, of om de "harde bodem" te meten voor baggeroperaties. Onder een hoge en lage frequentie verstaan we hier respectievelijk 200-220 kHz (kilohertz = 10^3 hertz) en 30-40 kHz.

Nauwkeurigheid en bereik: om een grote nauwkeurigheid en resolutie te bereiken, dient er gebruik te worden gemaakt van een zo hoog mogelijke werkfrequentie. Aan de andere kant is een hoge frequentie in water onderhevig aan meer demping dan een lagere, wat minder nauwkeurige resultaten produceert voor grote dieptes tegenover lage frequenties. Voor een signaal van 200-250 kHz geldt in zeewater een maximaal bereik van ongeveer 700 meter, inclusief de afstand dat het teruggekaatste signaal aflegt. Voor een signaal van 10-15 kHz in zeewater geldt een bereik van 15-20 km. In zoet water is het bereik 1,5 tot tweemaal zo groot.

Pulsbreedte/lengte: de keuze van de breedte van de puls is o.a. van belang voor discriminatie tussen objecten op de zeebodem die zich dicht bij elkaar bevinden, wat ook de nauwkeurigheid van de echosounder beïnvloedt. Wat de lengte betreft, is het beter om een zo kort mogelijke pulslengte te hanteren waar nog goede dieptemetingen mee kunnen verricht worden. Hoe korter de lengte van de puls, hoe beter de graad van

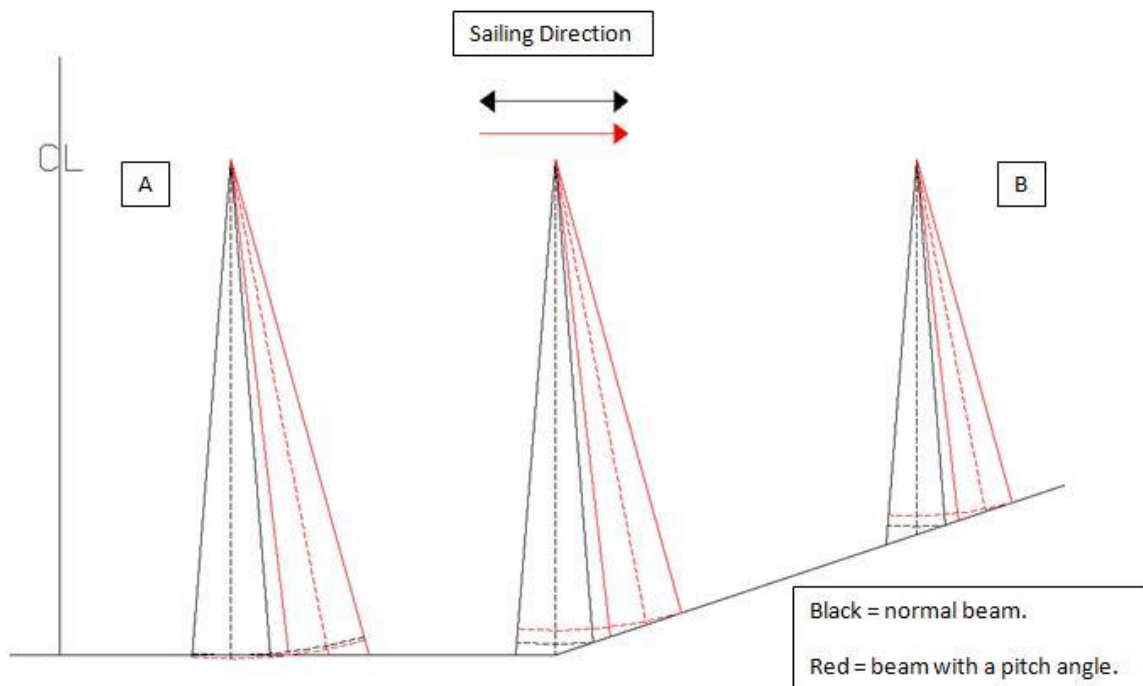
discriminatie tussen waargenomen objecten. Om deze redenen wordt een korte pulslengte gebruikt in ondiepe wateren, en lange pulslengtes in diepe wateren. In diepe wateren is meer vermogen vereist om goede reflecties te ontvangen. Langere pulslengtes verhogen het beschikbare vermogen van een echo sounder. (Lievens, 2019; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 1)

3.1.2 Singlebeam echo sounder

De singlebeam echo sounder (SBES) maakt gebruik van één golfbundel om metingen te verrichten. De metingen worden rechtstreeks waargenomen, de geluidssignalen omgezet in elektrische en gedigitaliseerd. Ze werken volgens het aangehaald principe waar de tijd wordt gemeten tussen zenden en ontvangen van de signalen om de diepte te bepalen. De single beam echo sounder registreert de kortst waargenomen afstand in de bundel, die uitgezet wordt op de centrale as van de bundel. Dit omdat de echo sounder niet kan bepalen van welk punt in de bundel de meting exact afkomstig is. Bijbehorende sounding grids, digitale representaties van de bodem, worden opgesteld met behulp van interpolatie, wat niet altijd voor de meest nauwkeurige resultaten zorgt. De voornaamste onderdelen van een single beam echo sounder opstelling zijn de transducer, motion reference unit (MRU), een dataverwerkingseenheid, plaatsbepalingssysteem (GPS) en een sound velocity profiler, die nog besproken worden. Er kan geöpteerd worden voor een single frequency (33kHz / 200-220kHz) of een dual frequency transducer, die meet met beide frequenties tegelijk. De motion reference unit is van belang om bewegingen van het schip te detecteren en corrigeren.

De openingshoek waarmee de bundel wordt uitgezonden bepaalt de voetafdruk op de bodem waarvan reflecties worden ontvangen. Het nadeel van het gebruik van slechts één bundel is dat objecten mogelijks niet gedetecteerd worden door het nauwe bereik ervan. Een hele regio in kaart

brengen is bijgevolg tijdrovend. Zoals gezegd is de echo sonder niet in staat te bepalen van welk punt in de voetafdruk de kortst waargenomen afstand afkomstig is. Bij het meten van een helling zorgt dit voor fouten in de positie en diepte zoals aangegeven op figuur 5.



Figuur 5 Meten van hellingen met een SBES

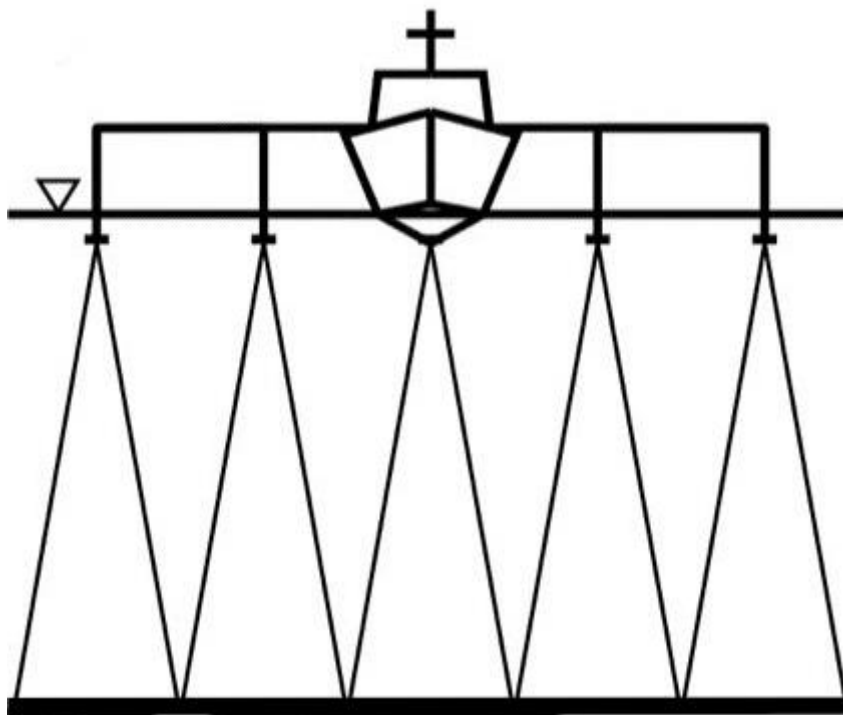
(Bron: 'How-to Singlebeam Settings—Qinsky', 2018)

Indien de bundel niet onder een hoek wordt uitgezonden, wordt de waargenomen diepte op de helling naar links verplaatst, op de centrale as. Het gevolg daarvan is de foutieve registratie van de positie en diepte van de helling. Een mogelijke oplossing is het uitzenden van de bundel onder een hoek richting de helling, de pitch angle. Bij hoeken die een richting loodrecht op de helling benaderen, bekomt men de meest betrouwbare resultaten. Deze methode wordt uitgevoerd onder lage snelheden en onder de voorwaarde dat de bewegingen van het vaartuig gering zijn. Een andere optie is het verkleinen van de openingshoek zodat de voetafdruk kleiner wordt. Zodra de rolbeweging van het schip groter is dan de halve

openingshoek van de bundel, heerst er een negatief effect op de dieptemetingen. (Lievens, 2019; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 2)

3.1.3 Multi-channel echo sounder

Een multi-channel echo sounder is opgebouwd uit een reeks single beam echo sounders en werkt volgens hetzelfde principe. Een reeks bestaat uit 3 tot 50 SBES's, gemonteerd op balken langs weerszijden van het onderzoeksvaartuig. Ze worden gemonteerd met een overlap van 20% tussen aangrenzende bundels om de integriteit van de data te verzekeren. De ontvangen data van elke SBES wordt individueel verwerkt door de verwerkingsunit. Ze worden gebruikt waar het meetbereik van een SBES niet volstaat en een zo hoog mogelijke dekking tot 100% vereist is.



Figuur 6 Kritische diepte van een multichannel echo sounder

(Bron: bewerkt van Grall, Kochanska, & Marszal, 2020)

Bij gebruik van een reeks SBES's opgesteld op deze manier moet extra belang gehecht worden aan kalibratie voor rollen en gieren van het schip. Individuele echo sounders ondervinden elks een specifieke invloed van de

bewegingen van het vaartuig. Nog een belangrijke factor om rekening mee te houden is de kritische diepte, aangeduid door de zwarte lijn op figuur 6. Indien 100% dekking vereist is, moet in acht genomen worden dat het te onderzoeken gebied dieper gelegen is dan de kritische diepte. Boven de kritische diepte worden er regio's tussen de voetafdrukken genegeerd wat tot ongunstige dekkingspercentages leidt. (van der Velden e.a., 2012, hfdst. 3)

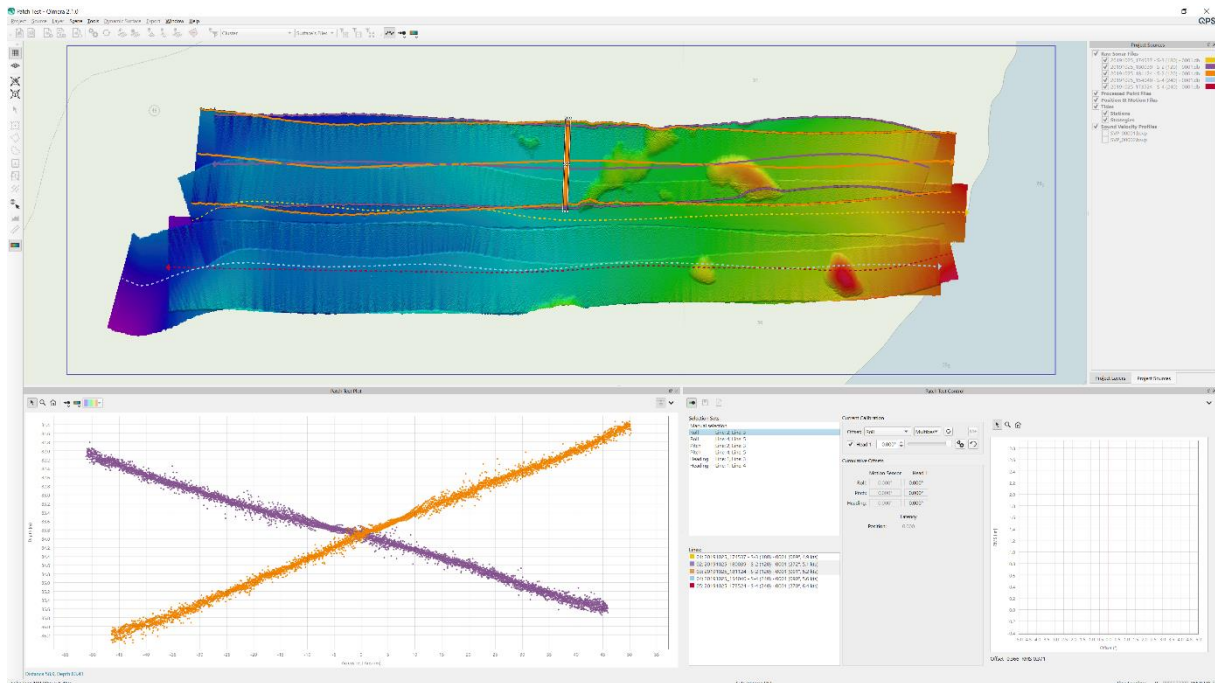
3.1.4 Multibeam echo sounder

De multibeam echo sounder is in staat meerdere dieptes te meten door gebruik van een reeks transducers, geconfigureerd in één echo sounder. Het bereik van de meerdere bundels varieert van 90 tot 180 graden, waarvan een kleiner bereik resulteert in nauwkeurigere metingen. Het bereik in graden wordt meestal gelimiteerd tot circa vier maal de waterdiepte om de nauwkeurigheid te optimaliseren.

Multibeam echo sounders worden toegepast voor de meest uiteenlopende bathymetrische projecten, in o.a. de baggerindustrie en offshore. Een hoge dekkingsgraad is mogelijk in een kortere tijdsspanne vergeleken met de voorgaande methodes, een belangrijke eigenschap in veel takken van de maritieme industrie. De reeks transducers om pulsen uit te zenden en te ontvangen kan apart of gecombineerd uitgevoerd worden, en kan zelfs worden opgedeeld in bakboord- en stuurboordtransducers. Kalibratie voor rollen, gieren en stampen van het schip, alsook van de echo sounder zelf, gebeurt aan de hand van een Patch Test. Dezelfde test wordt ook gebruikt bij de multi-channel echo sounder.

De test wordt uitgevoerd met behulp van een natuurlijk aanwezige of artificiële geconstrueerde drempel als helling en een aangrenzende vlakke sectie. Om de bewegingen van het schip en de latency of vertraging tussen de metingen van de echo sounder en het plaatsbepalingssysteem te bepalen, wordt er minimum vier keer over het model gevaren. Door met

verschillende configuraties qua snelheid en vaarrichting te werken kunnen alle parameters uitgelijnd worden m.b.v. geschikte software. (Lievens, 2019; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 5)



Figuur 7 Voorbeeld patch test

(Bron: 'How-to Qimera—Processing a Patch Test', 2018)

3.2 Motion reference unit

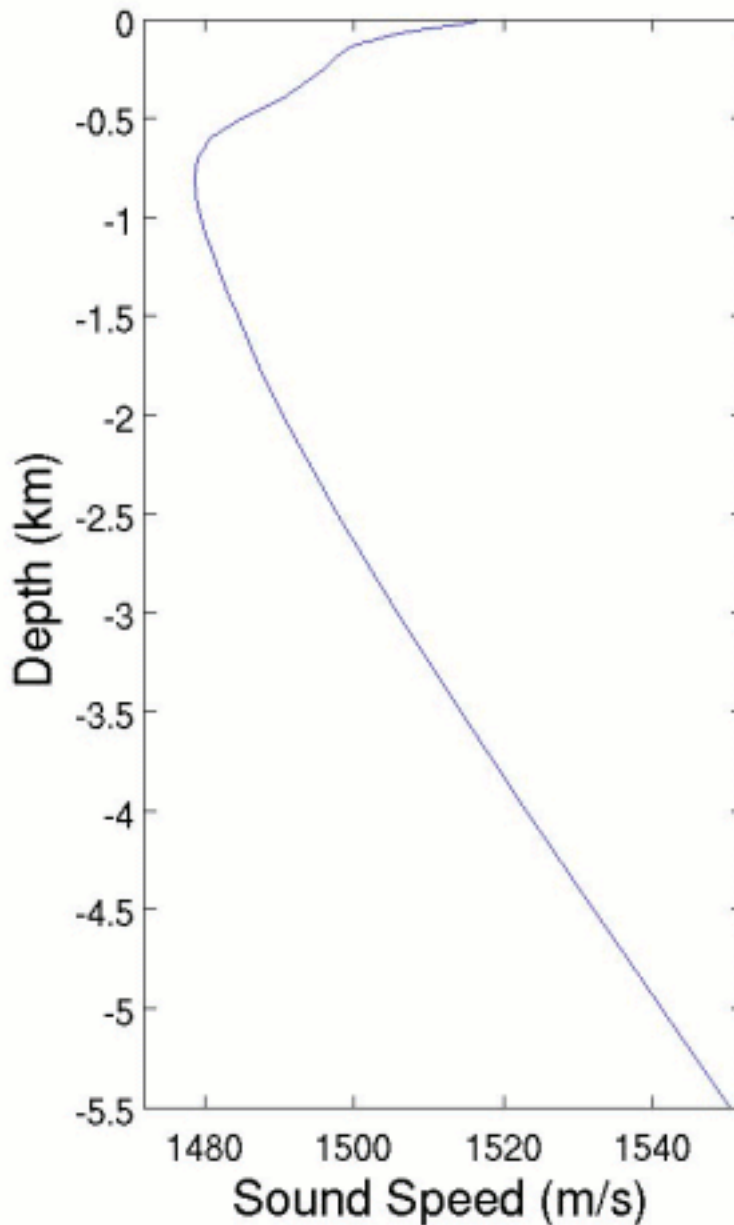
De motion reference unit (MRU) is een essentieel onderdeel op onderzoeksvaartuigen, in staat om de bewegingen en versnellingen van het vaartuig over de drie assen vast te leggen en te compenseren. Een MRU maakt gebruik van sensoren, accelerometers en één of meerdere gyroscopen om bewegingen te registreren zonder een externe referentie. Algoritmes bedienen aandrijvingsmechanismes die de bewegingen van het schip registreren. Een MRU wordt vooral toegepast bij onderzoeksvaartuigen op zee, waar het schip onderhevig is aan meerdere invloeden waarvoor compensatie vereist is. De gyroscopen zijn uitgevoerd in meerdere types die werken aan de hand van verschillende principes om rotaties te detecteren. ('Motion Reference Units (MRU) information', 2020)

3.3 Propagatie van geluidsgolven

Water is een uitstekend medium voor de voortplanting van geluidsgolven. Om de diepte te bepalen door middel van geluidsgolven dient de snelheid ervan in water gekend te zijn. Propagatie is geen vast gegeven, afhankelijk van meerdere parameters die een demping of versterking van de geluidsgolven teweegbrengen. Figuur 8 op de volgende pagina is een weergave van het profiel van de geluidssnelheid in zout water.

Buiten de diepte en gerelateerde druk zijn er twee andere parameters niet rechtstreeks aangeduid op het profiel die invloed hebben op de propagatie: de temperatuur en het zoutgehalte.

De eerste factor met een significante invloed op de geluidssnelheid in water is de temperatuur. De temperatuur van zeewater is vooral geografisch bepaald, maar ook seizoensgebonden en afhankelijk van het tijdstip gedurende de dag. Op het profiel is duidelijk dat een hogere watertemperatuur nabij het oppervlak bijdraagt aan een betere propagatie van de geluidsgolven. De invloed van de temperatuur blijft beperkt tot de thermocline, de diepte waarna de zeewatertemperatuur nagenoeg constant blijft of nog slechts weinig varieert. De thermocline loopt tot circa 1000 meter diepte. Een toename van één graad celcius resulteert in een toename van de geluidssnelheid van ongeveer vier meter per seconde. Dit verklaart het dalende profiel van de geluidssnelheid in de eerste 1000 meter, waar de dalende temperatuur een overheersende invloed uitoefent. Voor de bathymetrische studie van het Burchtse Weel zal de temperatuur de voornaamste invloed zijn. Tijdens de getijden is er vermoedelijk geringe circulatie in relatief ondiep water, waardoor de temperatuur de belangrijkste parameter is.



Figuur 8 Sound velocity profile

(Bron: 'Chart speed of sound with depth. Underwater sound channel', 2007)

Na de invloed van de temperatuur is de belangrijkste parameter voor de geluidssnelheid de diepte/druk. Toename in diepte en druk zijn lineair en hebben een positieve invloed op de propagatie van geluidsgolven. Een toename in diepte van 100 meter veroorzaakt een toename van de geluidssnelheid van ongeveer 1,7 meter per seconde. Na de thermocline blijft de temperatuur nagenoeg constant, en wordt de druk de primaire factor die de propagatie beïnvloedt. Naarmate de druk stijgt, worden de

deeltjes waaruit het water is opgebouwd samengedrukt. Zoals eerder aangehaald, is geluid in water afhankelijk van de compressie of het verdunnen van het medium. De hogere dichtheid maakt dat de compressie en verdunning eenvoudiger plaatsvinden, wat zorgt voor een gunstig effect op de propagatie. Op het Burchtse Weel zal de invloed van de druk slechts gering zijn.

Het zoutgehalte heeft een kleinere invloed op de propagatie, waar een stijging van 1% in zoutgehalte zorgt voor een toename van circa 1,4 meter per seconde van de geluidssnelheid. Het zoutgehalte in zeeën en oceanen schommelt rond de 35%. Het water dat het Burchtse Weel binnenstroomt is brak water, een mengsel van zout en zoet water, waarin de propagatie lokaal wordt vastgesteld. (NOAA, 2019; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 1)

3.3.1 Sound velocity probe

De geluidssnelheid kan lokaal bepaald worden aan de hand van een sound velocity probe. Bepaalde sound velocity probes meten de net besproken parameters, waarna aan de hand van één van de talrijke formules de lokale geluidssnelheid bepaald wordt. De andere methode berust op het gebruik van dezelfde techniek als echo sounders. Een plaat wordt gemonteerd op gekende afstand van de ingebouwde transducer waarbij de geluidssnelheid als variabele wordt afgesteld tot de plaat op de juiste afstand wordt gedetecteerd.

Door de echo sonder te koppelen aan de sound velocity probe kan de test uitgevoerd worden met de transducer die aangewend wordt om de uiteindelijke metingen te verrichten. De bekomen geluidssnelheid is namelijk enkel representatief voor de transducer waarmee de test gerealiseerd wordt. (van der Velden e.a., 2012, hfdst. 1)

3.4 LiDAR

Buiten de data bekomen door de echo sounder, beroepen we ons voor de studie van het Burchtse Weel ook op LiDAR-data. De meetpunten zijn verkregen via laseraltimetrische metingen van de Zeeschelde in het kader van geïntegreerde monitoring van het Schelde-estuarium, verricht via een vluchtplan en gerapporteerd door EUROSENSE (2018) voor de Vlaamse Waterweg NV. Light Detection And Ranging (LiDAR) is een systeem dat een hoge frequentie aan lichtpulsen benut om de afstand tot een object te bepalen. De lichtpulsen worden door een laser gereflecteerd op een spiegel richting het oppervlak, om aan de hand van volgende formule de afstand te bepalen, wederom aangehaald door van der Velden e.a (2012):

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

d [m] = afstand

c [$\approx 300\,000 \cdot 10^3$ m/s] = snelheid van het licht

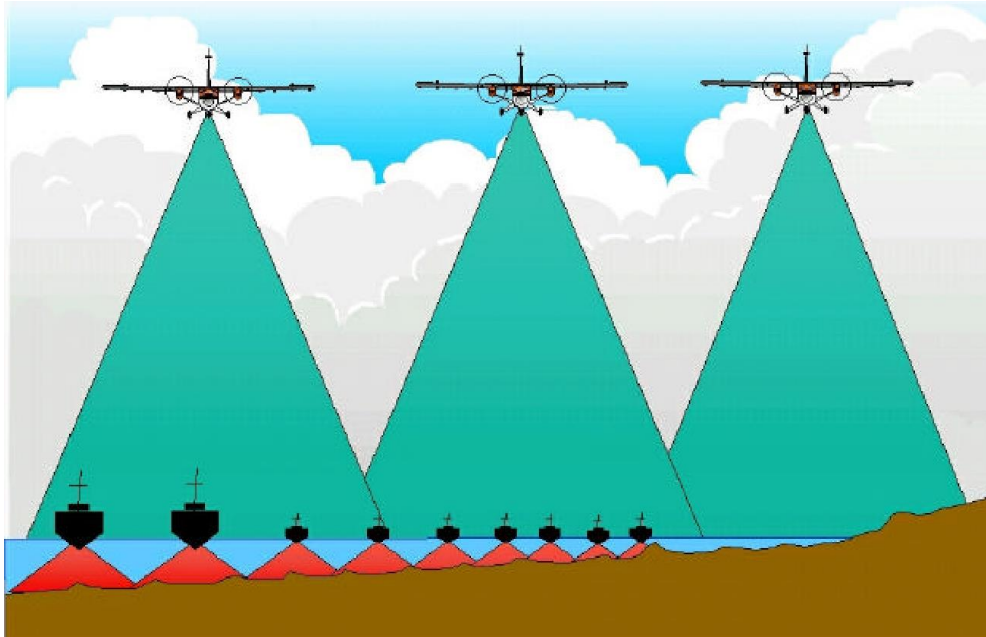
t [s] = tijd tussen zenden en ontvangen

Het rapport opgemaakt voor de gegevens van 2018 stelt dat het gebruikte type scanner lichtpulsen uitzendt aan een frequentie van 200 kHz onder een hoek van 60°, met een gehanteerde vlieghoogte van 1100 meter. Voor het gebruikte type scanner zijn dit de maximaal instelbare hoek en vlieghoogte waaronder gewerkt kan worden. Omdat de snelheid van de pulsen gekend is bekomt men nauwkeurige resultaten. Door aan hoge snelheid pulsen uit te zenden en te ontvangen is het ook mogelijk een 3D map te ontwikkelen van het te onderzoeken gebied. Omdat LiDAR hier ingezet wordt vanop een vliegtuig, is het belangrijk de extra parameters zoals de hoogte en oriëntatie van de sensor in acht te nemen bij verwerking van de resultaten. Vanuit de lucht werken heeft als voordeel dat vegetatie, mensen en andere ongewenste objecten digitaal verwijderd kunnen worden om enkel het beoogde terrein in kaart te brengen. Ook is

men in dezelfde tijdspanne in staat een veel groter gebied te bestrijken ten opzichte van een vaartuig. LiDAR is daarnaast eveneens in staat om de soms ontbrekende data bij vaartuigen in de 0 tot -10 meter regio op te vullen gezien er geen sprake is van diepgang. ('LiDAR UK', 2020; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 7)

De werking van LiDAR is analoog met de werking van een radar. Een LiDAR gebruikt laserlicht in de plaats van radiogolven, en er wordt een spiegel geroteerd in plaats van een antenne. Hoewel ontwerpen en aangewende onderdelen variëren per fabrikant, maakt praktisch elk hedendaags LiDAR-systeem gebruik van een fotodetector om het ontvangen optische signaal te converteren naar een elektrisch signaal. De werking ervan is aangewezen op plaatsen waar echosoundings verricht door een vaartuig zeer inefficiënt of zelfs ronduit gevaarlijk zijn. Ook kunnen de metingen daardoor zeer veel tijd in beslag nemen, waardoor de hele operatie zeer kostelijk is. Exact om deze redenen werd Bathymetric LiDAR ontwikkeld.

Een LiDAR systeem bestaat uit een laser scanner, een koelingsstelsel, een GPS-systeem en een inertial navigation system (INS). Een INS benut minstens drie gyro's en daarnaast drie accelerometers, waarvan de data verwerkt wordt in de inertial measurement unit (IMU). Dit omdat een perfect horizontale verplaatsing van een vliegtuig of helikopter nagenoeg onmogelijk is en er altijd sprake zal zijn van bewegingen in meerdere richtingen. Waar de oriëntatie van het luchttoestel bepaald wordt door het INS, verloopt de plaatsbepaling ervan veelal door middel van een RTK-dGPS. (Christ & Wernli Sr., 2013; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 7)



Figuur 9 LiDAR principe

(Bron: Guenther, 2004)

Het meest gebruikte systeem is de topographic LiDAR. Het principe berust op het gebruik van een infrarode laser om topografische metingen te verrichten en dus terrein boven waterniveau in kaart te brengen. De LiDAR data verkregen via de altimetrische studie van de Zeeschelde zijn verricht met behulp van lichtpulsjes met een golflengte van 1550 nanometer, in het infrarode spectrum. De bathymetrische LiDAR daarentegen maakt ook nog gebruik van een bijkomende groene laser om het wateroppervlak te penetreren en de bodem te registreren. Deze technologie staat beter bekend als Airborne LiDAR Bathymetry of ALB.

De tekortkoming van ALB ligt hem vooral in hoeverre de groene laser het water kan penetreren. In ideale condities zijn metingen van meer dan 70 meter diepte geen uitzondering, maar over het algemeen beperken de metingen zich tot ongeveer twee à drie maal de Secchi diepte, die wordt gemeten met een Secchi disk. De Secchi diepte is een erkende internationale standaard om de zichtbaarheid in functie van waterdiepte te bepalen. De gebruikte schijf is verdeeld in vier kwadranten, afwisselend zwart en wit, en wordt gradueel ondergedompeld. De diepte waarbij men

de zwarte en witte delen visueel niet meer kan onderscheiden van elkaar, heet de Secchi diepte.

De nauwkeurigheid van ALB is wel beduidend lager dan die van LiDAR voor topografische doeleinden en bedraagt ongeveer 15-25cm. Voor topografische toepassingen geldt een nauwkeurigheid van 5-10cm die nog verbeterd kan worden tot op 3cm door gebruik van extra sensoren in het gebied waar de lichtstralen effectief actief zijn. (van der Velden e.a., 2012, hfdst. 7; Waters, 2013)

3.4.1 Intensiteit

Een belangrijke factor voor de discriminatie bij gereflecteerde signalen is de intensiteit of amplitude van de ontvangen optische signalen. In een onderzoek omtrent de intensiteit van LiDAR signalen, (Kashani, Olsen, Parrish, & Wilson, 2015) wordt aangehaald dat elk oppervlak van een object of een bepaald materiaal het optisch signaal reflecteert aan een bepaalde intensiteit of amplitude.

Door gebruik te maken van deze gegevens is discriminatie en digitale verwijdering van ongewenste objecten vergemakkelijkt door middel van classificatie. De amplitude van ontvangen optische signalen is onder invloed van meerdere factoren waarmee rekening gehouden moet worden, waaronder de afstand, de hoek waaronder een object wordt waargenomen en de divergentie van de laserbundel. Door toepassing van intensiteitsonderzoek in ALB technologie kunnen o.a. sedimentologische karakteristieken bepaald worden en worden meer gedetailleerde weergaves geproduceerd. Een belangrijke eigenschap, gezien de propagatie van optische signalen een exponentieel negatief effect ondervinden met toenemende diepte. (Waters, 2013)

Bovendien kan de reflectiviteit van gekende objecten ook gehanteerd worden als een parameter voor het maken van een schatting van het meetbereik onder de gekozen frequentie voor een onderzoek. Tabellen

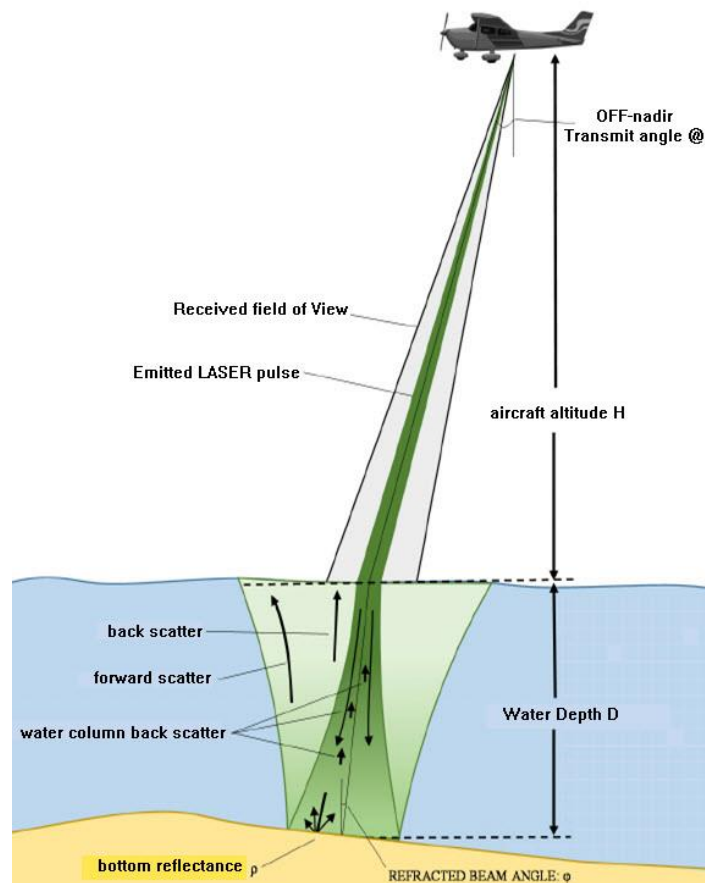
opgesteld voor de gebruikte scanner kaarten het verband aan tussen de zichtbaarheid waaronder de metingen uitgevoerd werden en een schaal gebaseerd op de reflectiviteit van objecten als percentage teruggekaatste stralen. ('Datasheet LMS-Q680i', 2012)

3.4.2 Refractie

Naast de intensiteit is de refractie van lichtbundels in water een noemenswaardige factor bij LiDAR projecten. Zoals aangehaald zijn topografische lasers niet geschikt voor penetratie in water, na slechts enkele centimeters is het merendeel van het vermogen van de laser verdwenen. De keuze van een groene laser voor bathymetrische studies is gebaseerd op een kortere golflengte binnen het lichtspectrum, en komt neer op 532 nanometer. Tegenover de lagere graad van absorptie in water staat een verlies in vermogen tegenover het infrarode spectrum.

Een andere beduidende factor voor de penetratie in water is de dempingscoëfficiënt, die de demping van licht weerspiegelt in functie van toenemende diepte. Hieruit blijkt dat het verval van de bundel exponentieel geschiedt, wat zorgt voor bijkomend verlies van vermogen. De helderheid van het water speelt hier ook een rol in. Extra vermogen induceren is niet voor de hand liggend, gezien de wetgeving het vermogen van lasers beperkt om schade aan de ogen te belemmeren. Tijdens een overvlucht accidenteel in de laser kijken bij een te groot vermogen kan blindheid teweegbrengen. Dit wordt opgelost door de bundel te verbreden, tot een voetafdruk van de bundel van circa één vierkante meter.

Daarnaast staat een hoger vermogen gelijk aan langere pulslengtes, wat op zijn beurt een lagere pulse rate veroorzaakt. Een lagere pulse rate houdt in dat er minder pulsen worden uitgezonden in dezelfde tijdspanne.



Figuur 10 Refractie LiDAR

(Bron: Kashani e.a., 2015)

Absorptie van de lichtbundel geldt niet enkel bij de groene bathymetrische laser, bij de infrarode variant wordt ook een deel van de intensiteit geabsorbeerd door de objecten waarop die weerkaatst. Een ander element dat enkel bij de groene laser geldt, is de reductie van de lichtsnelheid en bijbehorende buiging van de bundel, voorgesteld op figuur 10. De eerder aangehaalde formule is niet meer van toepassing, de lichtbundel volgt geen recht pad meer en de lichtsnelheid is niet langer een constante. Dit is de reden dat ALB technologie beide lasers benuttigt. De afstand tot het wateroppervlak wordt bepaald aan de hand van de infrarode laser, die het wateroppervlak nauwelijks of niet penetreert. Daarnaast is de refractie-index van water gekend ($n \approx 1,333$ bij water van 25°C). De snelheid van licht in water kan middels de index vastgelegd worden op ongeveer 225 000 kilometer per seconde. De afstand waarop de laserbundel

refractie ondervindt is dus gekend alsook de hoek waaronder de laser het water raakt. (Augustyn, 2020; Waters, 2013)

De wijziging van bewegingsrichting van de laser kan bepaald worden door beroep te doen op de wet van Snellius. Deze wet laat toe de hoek van refractie te bepalen tussen twee verschillende media. De hoek berekent men aan de hand van volgende formule:

$$n_i \cdot \sin(\theta_i) = n_r \cdot \sin(\theta_r)$$

$n_i = 1,00$ (refractiecoëfficiënt van lucht)

$n_r \approx 1,333$ (refractiecoëfficiënt van water)

θ_i = invalshoek van het licht in graden

θ_r = refractiehoek van het licht in graden

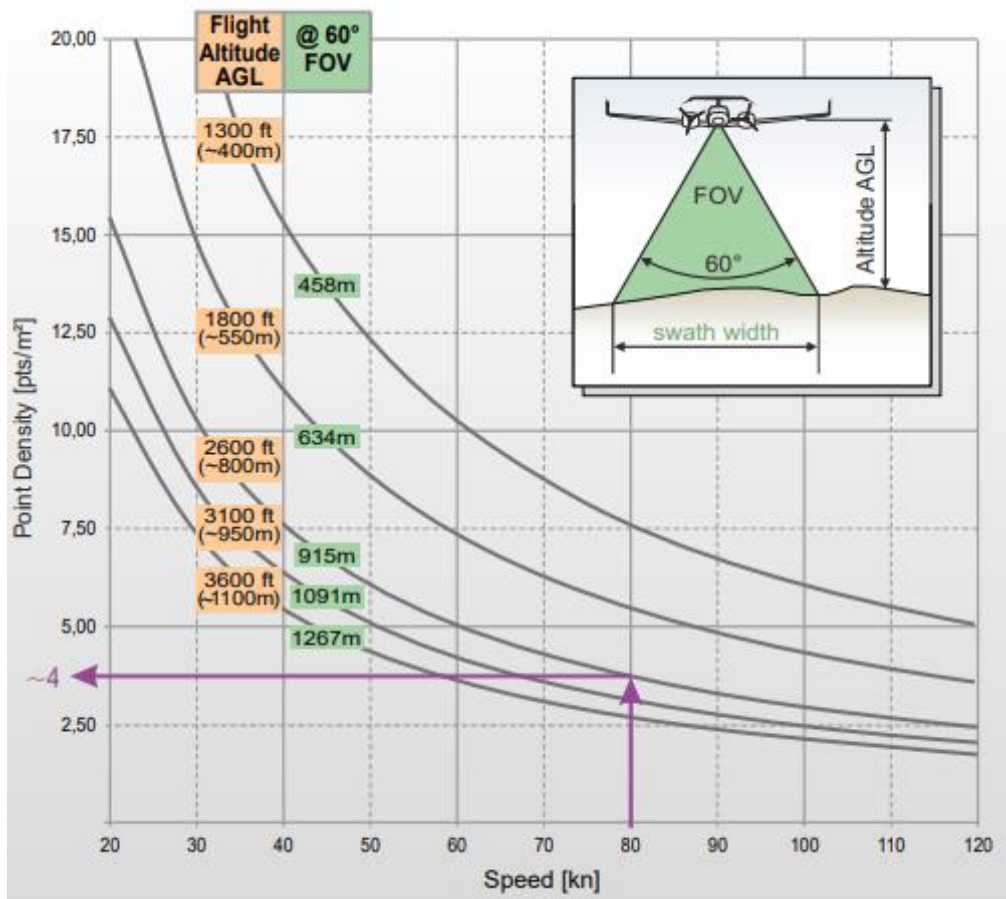
Als enige onbekende in de vergelijking, wordt de hoek waaronder refractie plaatsvindt berekend via omvorming van de formule. Voor media waarin licht zich sneller verplaatst dan lucht geldt een refractie weg van de normaal, de lijn loodrecht op de scheiding tussen beide media. Het tegendeel geldt voor media waarin licht zich trager verplaatst als lucht. Extra belangstelling moet besteed worden aan het feit dat verschillende reflectiesignalen worden ontvangen door de verstrooiing van de lichtkolom in water. Door het exponentiële dempingseffect zal de amplitude van de ontvangen signalen variëren naargelang de diepte, waardoor nog verdere analyse van de resultaten vereist is. ('Snell's law', 2020; 'The Angle of Refraction', 2020; Waters, 2013).

3.4.3 Dataverwerking

Nadat alle data over het gebied en de gegevens van het luchtvaartuig zelf tijdens de vlucht verzameld zijn, worden ze gecombineerd met de exacte overeenkomstige tijdstippen waarop ze genomen zijn. Zo bekomt men na

verwerking X, Y, en Z-coördinaten van elk punt ten opzichte van een gekozen referentievlak. De X-en Y-coördinaat zijn voor deze studie afgeleverd in Lambert-72 coördinaten, met TAW (Tweede Algemene Waterpassing) als referentievlak voor de Z-coördinaat, verkregen door de laserscanner. De metingen van het Burchtse Weel zijn onderdeel van een groter project, verwerkt uit een totaal van 19 stroken aan data van de Beneden-Zeeschelde. Per gevlogen strook wordt de begin-en eindtijd alsook de X- en Y-coördinaat geregistreerd. Gezien de topografische aard van dit project werd enkel een laser in het infrarode spectrum benut. Dit zal zich uiten in de bekomen sounding grids door een ontbrekende weergave van het bodemprofiel, als gevolg van onvoldoende penetratie van de laser in de watermassa.

Het verwerken van de metingen verloopt in 2 stadia: de voorbereiding en de nabewerking. De voorbereiding gebeurt ter plaatse, waar de metingen verricht worden. Zo kan er, indien nodig, meteen een tweede vlucht gerealiseerd worden moesten er op bepaalde plekken data ontbreken of moest de dichtheid van de meetpunten ontoereikend blijken. In het rapport van EUROSENSE wordt dit verzekerd door een theoretische puntendichtheid en overlap van de bundels van respectievelijk 1,5 punt per vierkante meter en 30%. Die theoretische dichtheid wordt achteraf geverifieerd aan de hand van een density plot, waaruit na analyse geconstateerd werd dat er geen specifieke problemen zijn ontstaan uit de data. Het gemiddeld aantal meetpunten per vierkante meter ligt boven de één voor dit onderzoek. Theoretisch wordt de puntendichtheid benaderd door middel van enkele parameters in acht te nemen in tabelvorm, namelijk de openingshoek waaronder de lichtbundel uitgezonden wordt, de snelheid van het vliegtuig en de vlieghoogte.



Figuur 11 Puntendichtheid LiDAR data

(Bron: verwerkt van 'Datasheet LMS-Q680i', 2012)

Op figuur 11 wordt dit duidelijk gemaakt met een voorbeeld waar aan 80 knopen gevlogen wordt op circa 800 meter hoogte. Hieruit wordt afgeleid dat de puntendichtheid rond vier punten per vierkante meter zal liggen. De grafiek is geldig bij een gemiddelde zichtbaarheid met een openingshoek en rolbeweging die respectievelijk 60° en maximaal 5° bedragen. Verder worden de GPS en INS-data geïntegreerd om het pad van het vliegtuig nauwkeurig te registreren. Tot slot wordt de nauwkeurigheid van de data vergeleken relatief aan gekende hoogterefenties en punten in de regio. De gemiddelde afwijking en standaarddeviatie dienen als duiding of de punten aan de vereiste nauwkeurigheden voldoen. De naverwerking van de data is afhankelijk van het beoogde doel van de metingen. Voor de bathymetrische studie van het Burchtse Weel geschiedt de verwerking door Qinsy, gerichte

software die nog verder toegelicht wordt. ('Datasheet LMS-Q680i', 2012;
De Vlaamse Waterweg NV, 2018; van der Velden e.a., 2012, hfdst. 7)

4 Hydrotrac II

De echo sounder aangewend voor de studie van het Burchtse Weel is de Hydrotrac II, een single beam, single-frequency portable hydrographic echo sounder. Op het Burchtse weel bestaan geen ideale condities om metingen te verrichten. Hydrotrac II is speciaal ontworpen om te werken in dergelijke situaties op kleine onderzoeksvaartuigen.

Technische specificaties:

Frequentie: Hydrotrac II is frequency agile, wat inhoudt dat dit toestel in staat is om snel van werkfrequentie te veranderen. Er is keuze tussen 24, 28, 33, 40, 100, 120, 200, 210 en 340 kHz.

Nauwkeurigheid: bij 200 kHz geldt een nauwkeurigheid tot op één centimeter. Bij een werking op 33 kHz is Hydrotrac II nauwkeurig tot op tien centimeter. De nauwkeurigheid van het apparaat is afhankelijk van welke waarde men hanteert voor de snelheid van de geluidsgolven in het water. Zoals eerder gezegd is deze gebonden aan verschillende parameters en dus veranderlijk van locatie tot locatie. Daarom moet elke echo sounder gekalibreerd worden om de nauwkeurigheid te garanderen.

De eerder aangehaalde formule voor het bepalen van de diepte wijzigt, omdat er voor de kalibratie nog een parameter en constante zijn die in acht worden genomen.

$$d = \frac{(v \cdot t)}{2} - k + dr$$

d [m] = diepte vanaf het wateroppervlak

v [m/s] = propagatie of snelheid van het geluid

t [s] = tijd tussen zenden en ontvangen

k = index constante van het systeem

d_r [m] = diepgang van de transducer ten opzichte van het wateroppervlak

(Teledyne Odom Hydrographic, 2012)

4.1 Transducer

Als hart van de echo sounder is de functie van de transducer het genereren en uitzenden van geluidsgolven, en het detecteren van de reflectie van diezelfde golven. De geluidsgolven worden veelal gegenereerd met behulp van een piëzo-elektrisch systeem. Het piëzo-elektrisch effect berust op het opwekken van elektrische spanning onder invloed van druk, en omgekeerd. Bij een transducer zorgt het aanleggen van een elektrische spanning voor een fysiek kleine, maar krachtige deformatie van het piëzo-elektrisch element, die een drukverandering teweegbrengt. (Yang, 2016)

De wijze van installatie van een transducer is cruciaal, een ongeschikte of slecht uitvoering van de installatie resulteert in een slechte werking van het systeem en onbetrouwbare resultaten. Bij het monteren handhaaft men een minimale diepte van 30 centimeter en is het aangewezen de transducer op een redelijke afstand van de boeg te monteren, om te vermijden dat luchtbellen komende van de boeg over de detector bewegen en resulteren in afwijkingen van de meetresultaten. Ook van belang is dat de transducer zich niet in de buurt bevindt van bronnen van cavitatie, turbulente stromingen of mechanische trillingen.

De aangewende methode voor deze studie is de "over the side transducer" installatiemethode. De transducer wordt stevig bevestigd aan een staaf die op zijn beurt verankerd wordt aan de zijkant van het vaartuig eens de transducer zich voldoende onder de waterlijn bevindt. Door gebruik te maken van bijkomende kabels kan de constructie zo immobiel mogelijk gemaakt worden. (Teledyne Odom Hydrographic, 2012)

4.2 Bar check kalibratie

De wijze van kalibratie voor singlebeam echo sounders is zoals eerder aangehaald de bar check methode. Indien correct uitgevoerd, worden variaties in de snelheid van het geluid, de diepgang en de system index error gecorrigeerd. Voor de realisatie wordt gebruik gemaakt van de weerkaatste golven van een object dat tot een gekende diepte ondergedompeld wordt. Voor een correcte uitvoering is het cruciaal dat men ervoor zorgt dat enkel het object wordt waargenomen en geen weerkaatsingen van de bodem ontvangen worden tijdens de test. Omdat Hydrotrac II gebruik maakt van een dynamic tracking gate, waardoor het apparaat zoekt naar echo's van de zeebodem, is het noodzakelijk de positie en breedte van de gate manueel te controleren om zo enkel het object te blijven waarnemen gedurende de test.

De "check bar" wordt onder de transducer op gekende diepte aangebracht, de eerste kalibratiediepte. Bij het kalibreren van Hydrotrac II, wordt op de kleinste kalibratiediepte enkel de indexwaarde aangepast tot deze overeenkomt met de exacte diepte van de check bar. Vervolgens laat men de check bar zakken tot zijn diepste kalibratiewaarde. De effectieve diepte van de check bar wordt hier ook weer ingevoerd. Dan past men de propagatiesnelheid aan totdat de kalibratiewaarde overeenkomt met de gekende diepte van de check bar. Door de propagatie op meerdere dieptes te bepalen bekomt men door de test de gemiddelde geluidssnelheid in de waterkolom waar gemeten zal worden. De indexwaarde aanpassen als onderdeel van de kalibratie heeft als voordeel dat deze ook gelijktijdig mee gecorrigeerd wordt. ('Shallow Water Single Beam Surveying Concepts', z.d.; Teledyne Odom Hydrographic, 2012)

5 GPS

Hydrotrac II beschikt over een ingebouwde GPS (Global Positioning System), die niet geschikt is voor nauwkeurige plaatsbepaling inzake bathymetrische studies. GPS is een systeem uit de verzamelnaam GNSS (Global Navigation Satellite System), dat alle satellietnavigatiesystemen omvat. Elk satellietnavigatiesysteem bestaat uit drie componenten:

Een deel in de ruimte, namelijk een constellatie van satellieten waar elk van de verschillende GNSS-systemen hun vast aantal satellieten en bijbehorende banen rond de aarde hebben. Elke satelliet heeft zijn eigen signaal waarmee de baan rond de aarde, het tijdstip, de status en andere vluchtdata mee worden uitgezonden. De differentiatie van satellieten in de gebruikerssegmenten berust op het implementeren van CDMA (Code Division Multiple Acces) in het signaal van elke afzonderlijke satelliet. Door aan elke satelliet een unieke code toe te kennen, kunnen alle satellieten uitzenden onder dezelfde frequentie en is de ontvanger in staat te identificeren van welke satelliet het signaal afkomstig is.

Het controlesegment, bestaande uit vaste stations, wereldwijd verspreid op aarde. Vanuit master en monitor stations worden satellieten gevolgd, gecheckt en gecorrigeerd door het uitzenden van correctiesignalen via data uploading stations. Correcties omvatten o.a. het regelen of aanpassen van parameters om de satellieten in de correcte baan rond de aarde te houden en om te zorgen dat de klokken aan boord van de satellieten uiterst nauwkeurig blijven lopen.

Tot slot het gebruikerssegment, de gebruikers van het systeem die in staat zijn GNSS signalen te ontvangen en te gebruiken voor plaatsbepaling. Gebruikers gaan van smartphones tot gespecialiseerde ontvangers voor navigatie- en surveydoeleinden. (*An introduction to GNSS*, 2015, hfdst. 1; 'Difference Between GPS and DGPS', 2017)

5.1 RTK-dGPS

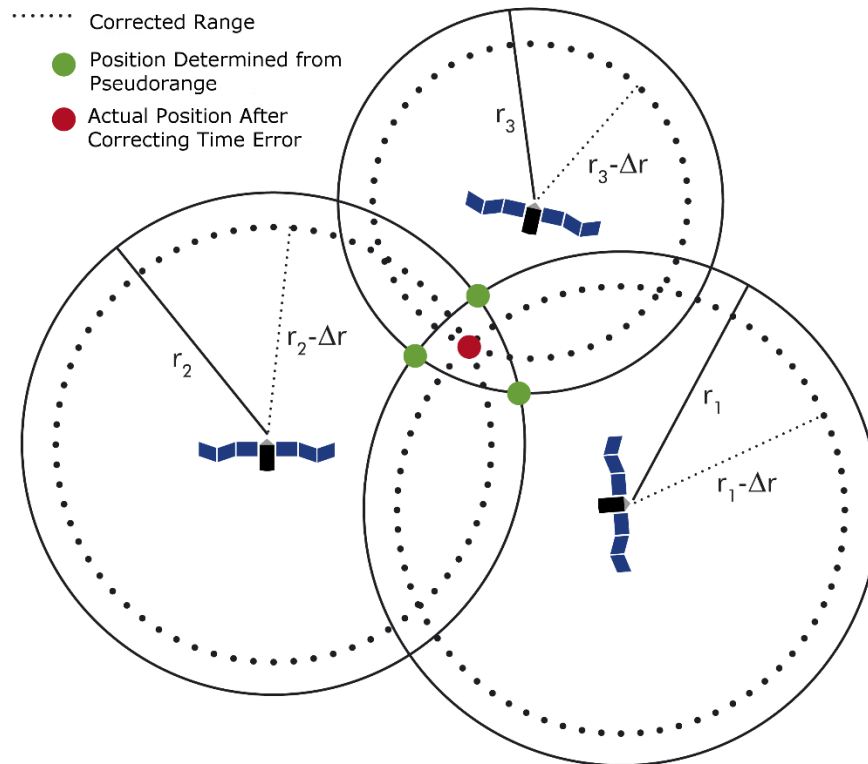
Plaatsbepaling m.b.v. GPS bereikt een nauwkeurigheid tot op ongeveer tien meter, ontoereikend voor bathymetrische doeleinden. Een eerste stap om een grotere nauwkeurigheid te realiseren is door toepassing van dGPS (differential Global Positioning System). Tabel 1 illustreert de voornaamste verschillen tussen beide systemen.

Tabel 1 Vergelijking GPS & dGPS

(Bron: verwerkt van 'Difference Between GPS and DGPS', 2017)

Vergelijking	GPS	dGPS
Aantal ontvangers	1 (de GPS ontvanger)	2 (station + rover)
Nauwkeurigheid	10-15 meter	10 centimeter
Bereik	Globaal	Lokaal (± 100 km)
Coordinate system	WGS84	Local coordinate system

GPS gebruikt uitsluitend één ontvanger, namelijk de gebruiker zelf. De positie op aarde wordt bepaald op basis van de signalen van doorgaans vier satellieten. De reden hiervoor berust op de onnauwkeurigheid van de klokken in de ontvangers die veelal werken op kwartskristallen, tegenover de atoomklokken aan boord van satellieten. De berekeningen voor de reistijd van het signaal zijn bijgevolg de oorzaak voor afwijkingen in de plaatsbepaling. Tweedimensionaal kan dit voorgesteld worden aan de hand van drie satellieten, waarbij het principe van trilateratie gehanteerd wordt. Figuur 12 illustreert de trilateratie in 2D.



Figuur 12 2D trilateratie van een GPS-systeem

(Bron: Olson, 2018)

De drie positiecirkels van de satellieten convergeren initiëel niet in één punt. Deze fout is bekend bij de ontvanger, alsook de oorzaak van de fout. De ontvanger wordt geprogrammeerd zijn interne klok voor of achter te laten lopen zodat de drie cirkels perfect convergeren in één punt. De driedimensionale ruimte brengt een extra parameter met zich mee, waaruit de noodzaak aan een vierde satelliet volgt. Ondanks de configuratie van de klokken kan een fout van enkele nanoseconden zorgen voor fouten in de positiebepaling die oplopen tot enkele meters. Deze manier van positiebepaling is zeer gevoelig aan nog verscheidene andere fouten die de nauwkeurigheid negatief beïnvloeden. GPS bereikt hierdoor een nauwkeurigheid van tien tot vijftien meter.

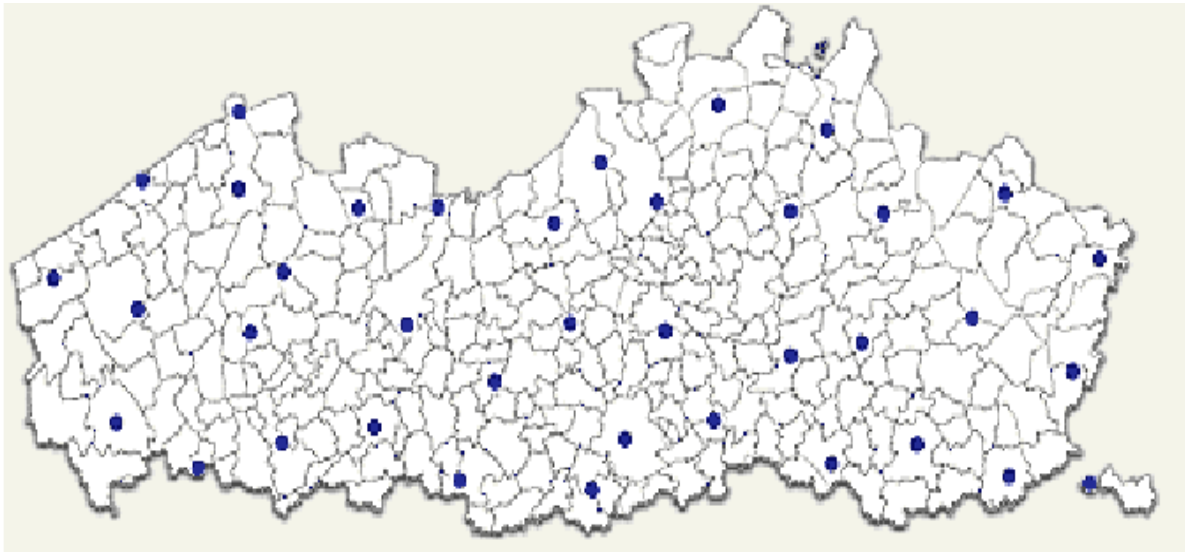
Om een grotere nauwkeurigheid tot op tien centimeter te bekommen, is het meer geavanceerde dGPS ontwikkeld. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een extra station op aarde waarvan de locatie bepaald is met de hoogste

graad van nauwkeurigheid. In plaats van de locatie van de gebruiker rechtstreeks te berekenen aan de hand van de signalen van de satellieten, wordt deze bepaald in combinatie met de gegevens van de exacte locatie van het referentiestation. Nadat het referentiestation de signalen van de satellieten ontvangt, vergelijkt deze de positie bepaald door de satellieten met de gekende positie van het station. Deze gegevens worden als kalibratiesignaal doorgegeven aan de gebruiker zodat de nodige correcties worden toegepast om een nauwkeurigere positie te verkrijgen. Vanaf men het gebruikelijke bereik van dGPS (± 100 kilometer) overschrijdt, gaat dit gepaard met een verlies aan nauwkeurigheid van ongeveer één meter per 150 kilometer afstand. (*An introduction to GNSS*, 2015, hfdst. 2 & 4; 'Difference Between GPS and DGPS', 2017)

Waar dGPS een zekere progressie is ten opzichte van GPS, kan een nog grotere precisie bereikt worden door RTK (Real Time Kinematics) toe te passen. Toepassing van RTK drijft de nauwkeurigheid van plaatsbepaling op tot één centimeter, de vereiste precisie voor o.a. bathymetrische studies, die ook toegepast zal worden in deze studie. Het werkt veelal verder op het principe van dGPS en maakt tevens gebruik van een bijkomend referentiestation met gekende positie dat informatie en correcties doorstuurt naar de gebruiker. Het RTK principe utiliseert de fase van de satelliet signalen, waarmee vervolgens de nodige correcties worden uitgezonden. Deze fase wordt voortdurend uitgezonden, wat impliceert dat correcties berekend en toegepast worden op het moment zelf, in "real time".

De grote progressie op vlak van nauwkeurigheid gaat gepaard met een verlies aan bereik, waarbij de gebruiker zich op een maximale afstand van 10 à 20 kilometer van een referentiestation mag bevinden. In België bevinden zich in totaal 61 van deze stations, waarvan 37 in Vlaanderen, (FLEPOS: Flemish Positioning Service), 23 in Wallonië (Walcors: Wallonia continuously operating reference stations) en één resterend station in het Brussels hoofdstedelijk gewest (GPSBru). In Vlaanderen bedraagt de

gemiddelde afstand tussen de stations 17 kilometer. (*An introduction to GNSS*, 2015; 'Real Time Kinematics', 2011; Voet, 2012)



Figuur 13 FLEPOS

(Bron: Biesemans e.a., 2010)

Zowel referentiestation als gebruiker moeten in staat zijn fasen te kunnen ontvangen. Bij gebruik van RTK is het aangewezen om van zes satellieten signalen te ontvangen. In de ontvangers wordt het faseverschil gemeten tussen zelfgegenereerde signalen en de ontvangen identieke signalen van de satellieten. Vooraf wordt het gehele aantal golven tussen de satellieten en ontvanger bepaald, die samen met het faseverschil de elementen vormen om een basislijn met hoge precisie op te maken tussen de twee ontvangers. Doordat de positie van het referentiestation nauwkeurig gekend is, kan samen met de gevormde basislijn de positie van de gebruiker met grote nauwkeurigheid bepaald worden. De repetitieve korte waarnemingstijd is bij dit systeem van essentieel belang indien de gebruiker niet stationair is en constante plaatsbepaling vereist is. (*An introduction to GNSS*, 2015; 'Real Time Kinematics', 2011)

6 Praktische voorbereidingen

De LiDAR data is reeds verzameld en klaar voor verwerking door Qinsy. Door gebruik van de eerder aangehaalde toestellen en principes gaan we eigenhandig metingen verrichten op het Burchtse Weel. De getijpoorten worden gesloten bij hoogwater, zodat we met een klein gemotoriseerd vaartuig metingen kunnen uitvoeren met Hydrotrac II. Na een bezoek aan het Burchtse Weel werd een geschikte locatie bepaald om het vaartuig te water te laten, aangeduid op figuur 14.



Figuur 14 Satellietfoto locatie

(Bron: verwerkt van 'Google maps', 2018)

Ondanks de lage graad van begroeiing, was het in de huidige omstandigheden onmogelijk de trailer schadeloos op een goede locatie te positioneren. Om deze reden hebben we rubberen matten verankerd tussen de keien tot aan de grens van hoogwater om dit vlot en schadeloos te doen verlopen.



Figuur 15 Opstelling matten

(Bron: eigen figuur)

Na enkele keren aan het Burchtse Weel te hebben afgesproken om de matten te verankeren hebben we een poging ondernomen de trailer te laten zakken, met als conclusie dat er nog planken noodzakelijk waren om enkele putten en stenen te overbruggen. Ook stelden we vast dat een sterkere winch nodig was om de trailer na de metingen terug op de helling te trekken. Geruime tijd op voorhand werd ook BAM (Beheersmaatschappij Antwerpen Mobiel) gecontacteerd met de vraag voor de mogelijkheid om de getijpoorten te sluiten van zodra het hoogwater is om zo alle nodige metingen te verrichten. In augustus 2018 werd bericht ontvangen dat het niet meer mogelijk was de getijpoorten te sluiten.

7 Qinsy

Na berichtgeving dat het onmogelijk was de getijpoorten te sluiten, is het niet mogelijk een deel van de besproken apparatuur en technieken toe te passen, waardoor we genoodzaakt zijn ons voor verder onderzoek louter te baseren op de LiDAR-data, die een periode van zeven jaar bestrijkt.

Het verwerken van de metingen gebeurt via Qinsy (Quality Integrated Navigation System), op maat gemaakte software voor o.a offshore-operaties, pijpleggers en hydrografische projecten. ('QPS - Maritime software solutions', 2018)

7.1 Geodetisch coördinatensysteem

De data van de LiDAR metingen is afgeleverd in Lambert 72 (BD72) coördinaten. België hanteert dit systeem sinds de jaren '70, gebaseerd op het geodetisch referentiekader Belgische Datum 1972. Veel hedendaagse, Belgische topografische kaarten worden nog steeds uitgevoerd in Lambert 72. BD72 komt tot stand door een hoekgetrouwe kegelprojectie. Het oppervlak tussen 2 gekozen breedtecirkels kan daardoor nauwkeurig weergegeven worden op een plat vlak. Hoe dichterbij een breedtecirkel, hoe kleiner de fout op kaart zal zijn, met een maximum afwijking van tien centimeter per kilometer. Deze eigenschappen maken de Lambertprojectie geschikt voor kleine landen zoals België.

Voor BD72 zijn de gekozen parallellen respectievelijk $49^{\circ} 50' 00'' 00204$ N en $51^{\circ} 10' 00'' 00204$ N. De oorsprong bevindt zich ten noorden van Parijs, in het punt $49^{\circ} 18' 0''$ N, $2^{\circ} 18' 0''$ E. Hieruit worden de afstanden bepaald voor de locatie van een punt weer te geven. Dit gebeurt niet op de conventionele manier, met lengte- en breedtecoördinaten. BD72 weergeeft punten als afstanden in meter ten opzichte van het vastgelegde referentiepunt, waar de oost- en noordrichting als positief beschouwd worden op de X- en Y-as. In de plaats van lengte- en breedtegraden

spreken we van easting en northing. ('European Terrestrial Reference System 1989', 2020; 'Lambertcoördinaten', 2013; 'Lambertcoördinaten', 2020);

Eind jaren '80 kwamen er vorderingen op Europees vlak door de invoering van een nieuw geodetisch referentiekader, ETRS89 (European Terrestrial Reference System 89), geschikt bevonden voor plaatsbepaling op het gehele Europees continent. De latere versie van Lambert 72, Lambert 2008, is hiermee compatibel. De totstandkoming van ETRS89 berust in principe op een bevrozing van de punten van WGS84 (World Geodetic System 84) op 1 januari 1989. Deze keuze werd gemaakt gezien WGS84 jaarlijks wijzigt door toedoen van de platen tektoniek, die een jaarlijkse verschuiving van ongeveer twee centimeter veroorzaakt in de oost-west- en noord-zuidrichting. Aangezien het Europees continent zich op één plaat bevindt, is deze wijziging voor alle punten op het Europese continent gelijk. Daarom werd er gekozen om de WGS84 punten te bevriezen en deze verder onveranderd te gebruiken. Bovendien is ETRS89 compatibel met WGS84, het veelal geprefereerde globaal systeem voor cartografie en plaatsbepaling. ('European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)', 2018; 'Lambert 2008', 2020)

7.1.1 Referentie-ellipsoïde

WGS84 en ETRS89 zijn compatibel omdat ze beiden gebruik maken van dezelfde referentie-ellipsoïde, namelijk GRS80. Het belangrijkste aan WGS84, is dat dit systeem wordt aangewend voor GPS plaatsbepaling. GPS-coördinaten in Europa zijn gerefereerd aan ETRS89. Hieruit kunnen we concluderen dat een omzetting van Lambert 72 nodig is om te kunnen werken met de gegevens. Waar ETRS89 en ook Lambert 2008 gebruik maken van de GRS80 ellipsoïde, gebruikt Lambert 72 de bijbehorende Hayford ellipsoïde. (Depredomme, 2018)

Tabel 2 Vergelijking referentie-ellipsoïdes

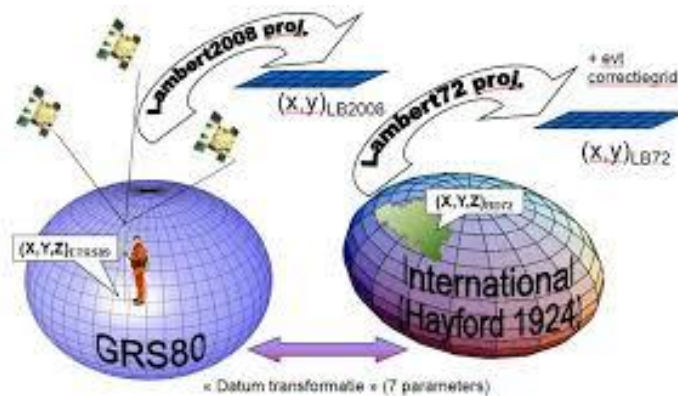
(Bron: verwerkt van 'Transformation et conversion de Coordonnées', 2017)

Ellipsoïde	GRS80	Hayford 1924
½ grote as (a)	6 378 137 m	6 378 388m
Afplatting (f)	1 / 298,257222101	1 / 297

Op bovenstaande tabel zijn de verschillen aangeduid tussen beide ellipsoïdes, waarvan de afplatting als volgt wordt gedefiniëerd:

$$f = \frac{a-b}{a}$$

Waarbij 'a' de halve lange as, en 'b' de halve korte as van de ellipsoïde voorstellen.



Figuur 16 GRS80 vs. Hayford

(Bron: Depredomme, 2018)

Figuur 16 illustreert de twee betreffende referentie-ellipsoïdes. Voor de conversie tussen beide coördinatensystemen is een zeven-parametertransformatie noodzakelijk. Enkel zal de omzetting niet van Lambert 72 naar Lambert 2008 plaatsvinden, wat figuur 16 illustreert,

maar naar ETRS89. Om geen verwarring te creëren tussen Lambert 72 en 2008 werd gekozen voor een offset van 500 kilometer in X en Y tussen beide coördinaatsystemen.

Het Nationaal Geografisch Instituut van België heeft deze parameters gepubliceerd om coördinaten uit beide systemen te kunnen omrekenen. De gepubliceerde parameters zijn volgens de Coordinate Frame Rotation Convention. Indien er gebruik gemaakt wordt van de Position Vector Convention moet het teken van de rotatie- en translatieparameters aangepast worden. In geval van een tekenfout leidt de verkeerde conversie tot positiefouten van ± 65 meter. ('Hulpmiddelen voor transformatie van coördinaten', 2020; 'Transformation et conversion de Coordonnées', 2017)

Tabel 3 Zeven-parametersysteem

(Bron: verwerkt van 'Transformation et conversion de Coordonnées', 2017)

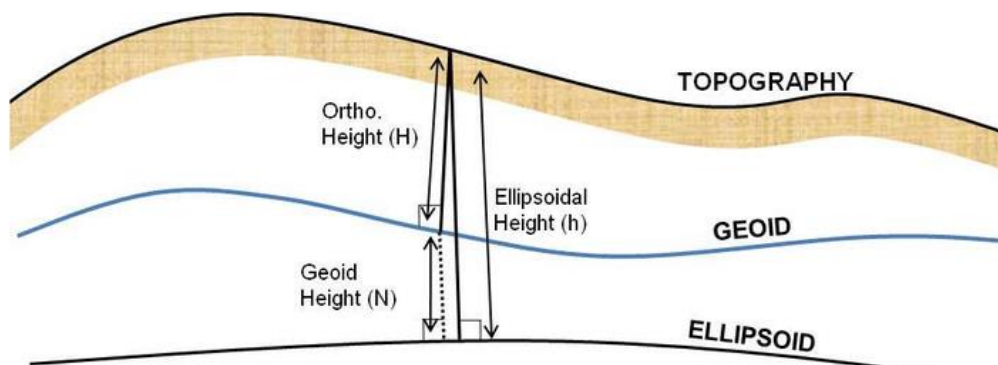
conventie: Coordinate Frame Rotation				
7 parameters ETRS89 --> BD72		X	Y	Z
	Translatie (m)	106,868628	-52,297783	103,723893
	Rotatie in zestigdelige "	0,33657	-0,456955	1,842183
	Schaalfactor (ppm)	1,000001275		

In Europa rekent men een rotatie met de klok mee als positief, wat overeenkomt met de Position Vector Convention. Om BD72 coördinaten te

converteren naar ETRS89, moet men het teken van zowel de rotatie- als translatieparameters wijzigen. Daarnaast moet de inverse van de schaalfactor genomen worden. Vervolgens is er nood aan een zogenaamd correctierooster voor de BD72-gegevens, omdat er in de gegeven parameters geen rekening wordt gehouden met de lokale verschillen tussen de twee geodetische systemen. Dit levert een verschil op tussen de gekende en berekende BD72 coördinaten, resulterend in afwijkingen in X en Y. Deze zijn gemodelleerd in een correctierooster zodat de correcties ΔX en ΔY in rekening worden gebracht. ('Hulpmiddelen voor transformatie van coördinaten', 2020)

7.1.2 Hoogterefereentie

De hoogte genomen boven de ellipsoïde is een onderdeel van de driedimensionale geodetische coördinaten. Voor bathymetrische doeleinden kan de hoogte boven de ellipsoïde niet gebruikt worden. De ellipsoïde weerspiegelt een wiskundig benaderd model van de aarde, maar heeft verder geen fysische betekenis.



Figuur 17 Verband tussen geoïde en ellipsoïde

(Bron: Sulaiman, Nursyahirah, Kamaluddin, Mat Akhir, & Othman Mohd, 2016)

We willen de hoogte van een punt boven de geoïde bepalen om een betrouwbare representatie te krijgen van de meetpunten. Hiervoor is de orthometrische hoogte van belang, die omschreven wordt door volgende formule:

$$H [m] = h \pm N$$

Ofwel, de orthometrische hoogte is gelijk aan de som of het verschil van de ellipsoïdale hoogte en de geoidale hoogte, afhankelijk van de onderlinge ligging van de geïde en de ellipsoïde die varieert volgens het benaderd model. Deze wordt beschouwd als de orthometrische hoogte, gerefereerd aan de Tweede Algemene Waterpassing (H_{TAW}), het Belgische hoogterefereentievlak dat als nulpunt de gemiddelde laagwaterstand in Oostende gebruikte. De TAW omvat ongeveer 19 000 merktekens die verspreid zijn over gans België, waarvan het fundamentele punt zich momenteel bevindt in de Koninklijke Sterrenwacht te Ukkel.

(‘Hulpmiddelen voor transformatie van coördinaten’, 2020; Lambot, 2013)

Om de hoogte van ETRS89 naar H_{TAW} te converteren, is een geïdemodel ontwikkeld dat het verband weergeeft tussen H_{TAW} en de ellipsoïdale hoogte. Het betreft een altimetrisch conversierooster waarop interpolaties worden uitgevoerd. In België wordt het model hBG18 gebruikt, gebaseerd op een gravimetrisch geïdemodel en 3707 GPS-punten. (‘Hulpmiddelen voor transformatie van coördinaten’, 2020)

In Qinsy hoeven we deze berekeningen niet zelf maken, maar zijn ze beschikbaar gesteld als te downloaden geodetische pakketten door Quality Positioning Services, die vervolgens worden geïntegreerd.

7.2 Delaunay Triangulatie

De jaarlijkse sedimentatie van sediment uit de Schelde in het Burchtse Weel wordt onderzocht aan de hand van volumeberekeningen, uitgevoerd op de sounding grids opgebouwd uit de meetpunten. Het volume wordt berekend voor elke dataset in Qinsy en nadien vergeleken. De datasets staan in PTS-files, of point clouds bestanden. Deze bestanden zijn eenvoudig opgebouwd zodat de data weergegeven wordt door X- Y- Z-

coördinaten, herkend door de software. Het volume van elk puntenrooster wordt bepaald door het principe van Delaunay triangulatie te hanteren.

Delaunay triangulatie beschouwt de meetpunten als hoekpunten om een netwerk van driehoeken te vormen. Het principe bestaat eruit de driehoeken zo gelijkzijdig mogelijk te vormen met minimale zijlengtes. Op een gegeven set van punten zijn meerdere methodes mogelijk. Om de optimale methode te selecteren zijn er criteria vastgelegd:

Voor elke driehoek bestaande uit drie vaste hoekpunten geldt dat binnenin de cirkel gedefiniëerd door de drie hoekpunten, er geen enkel ander punt mag liggen.

Het minimum van elke hoek in de triangulatie wordt gemaximaliseerd. Dit criterium is geldig wanneer een diagonaal wordt bepaald om een vierhoek in twee driehoeken te delen. De optimale diagonaal wordt gekozen zodat de kleinste inwendige hoek maximaal is. Dit betekent dat steeds een triangulatie gekozen wordt waarbij de kleinste hoek gelijk aan of groter is dan de kleinste hoek van elke andere mogelijke triangulatie.

Deze criteria worden verder benut aan de hand van wiskundige algoritmes. Het hanteren van de Delaunay triangulatie levert enkele belangrijke voordelen op:

Doordat de driehoeken gevormd worden met de meetpunten zelf en de data bijgevolg deel is van het vlak waarin de punten zich bevinden, is interpolatie niet nodig.

De dichtheid van de meetpunten blijft bewaard. Waar de dichtheid van de meetpunten hoog is, worden kleine driehoeken gevormd. Waar de dichtheid laag is, worden grote driehoeken gevormd.

Met gebruik van deze methode en bijbehorende criteria worden dus driehoeken gevormd met de meetpunten. De getrianguleerde meetpunten

vormen relatief aan het H_{TAW} referentievlak een 3D-structuur, wat het mogelijk maakt het volume te berekenen aan de hand van gevormde prisma's. In de resultaten wordt weergegeven hoeveel volume er boven en onder dit referentievlak gevormd wordt. Afhankelijk van de graad van de hellingen en lokale hoogteverschillen worden verschillende methodes toegepast. Complexe prisma's, isopachyten en trapezoidale prisma's kennen elk hun toepassingsgebied en nauwkeurigheid.

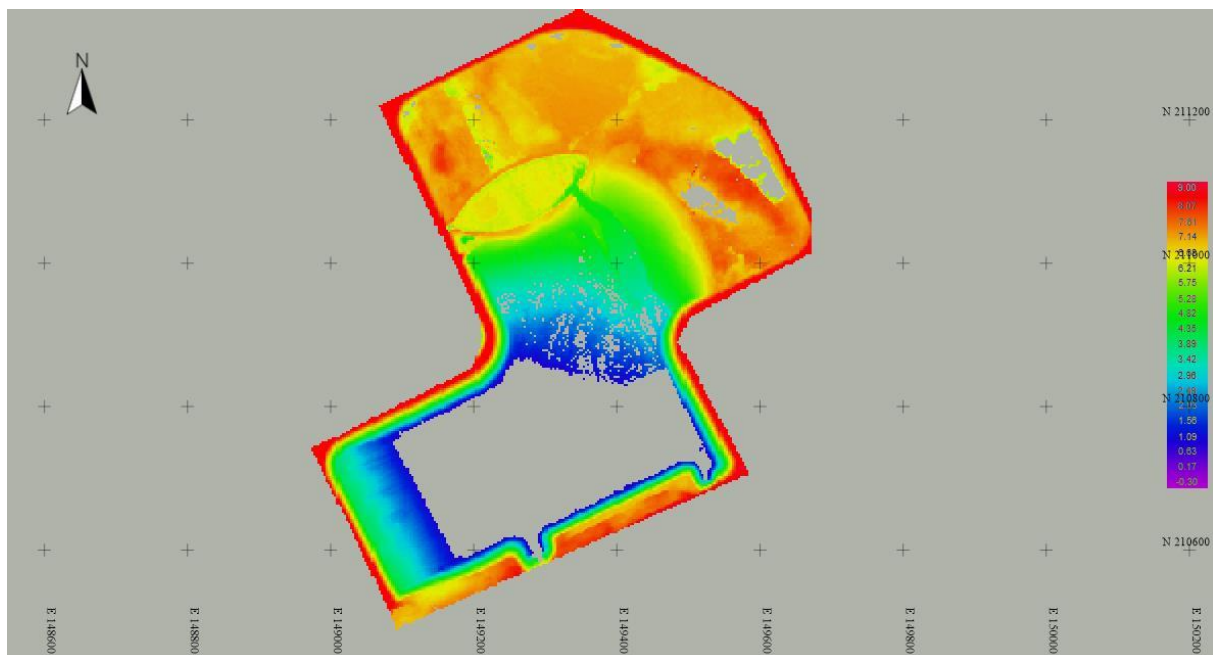
Door te werken met complexe prisma's bekomt men de grootste nauwkeurigheid. De opbouw bestaat uit overlappende en geprojecteerde driehoeken, die nog verder worden ingedeeld in polygonen (veelhoeken). Daaruit worden nog meerdere verticale prisma's gevormd. Deze complexe werkmethode wordt gezien als de ultieme nauwkeurigheid op vlak van triangulatie. Ondanks de hoge graad van nauwkeurigheid wordt deze methode in weinig programma's geïmplementeerd, gezien het een zeer tijdrovend proces is waarvoor veel verwerkingscapaciteit vereist is. Isopachyten geven daarentegen een nauwkeurige benadering van het volume waar lokale hoogteverschillen langzaam toe- en afnemen.

Aan de hand van een referentiemodel opgesteld uit trapezoidale prisma's werd de nauwkeurigheid van isopachyten en eenvoudige verticale prisma's getest. Daaruit werd geconcludeerd dat beide technieken een gelijkaardige nauwkeurigheid vertegenwoordigen voor een bepaalde densiteit van de meetpunten. Waar de densiteit van de meetpunten hoog was, en dus kleinere driehoeken gevormd werden, was het foutenpercentage kleiner dan 0,8%. Waar de densiteit van de punten lager lag, bleef het foutenpercentage kleiner dan 1%. Bij vergelijking van de isopachyten- en complexe prismatechniek constateerde men een wisselende geprefereerde techniek, afhankelijk van de densiteit van de meetpunten. (Eguchi, 2005; Kudowor & Taylor, z.d.) In Qinsy wordt geen verdere uitleg verschaft over welke van de technieken van toepassing is voor de verwerking van data.

7.3 Sounding grids

De net besproken referentiemodellen en methodes zijn geïntegreerd in Qinsy of kunnen we handmatig instellen. Met Lambert 72 als coördinatensysteem en het laatste geodetisch pakket kan de eerder verzamelde data door de Lidar verwerkt worden zonder verdere bewerkingen. We beschikken over Lidar data gaande van 2011 tot en met 2018. Één van de onderzoeksvragen is aan welk tempo de sedimentatie van het Burchtse Weel zich voortzet. Door de verschillende surveys, weergegeven in sounding grids, te vergelijken kunnen we aan de hand daarvan bepalen hoe snel en waar dit fenomeen zich exact voordoet.

Het eerste jaar dat besproken wordt is 2011, waar ook de werkwijze wordt uitgelegd die op de andere jaren van toepassing is. In de survey manager van het programma wordt een nieuw project opgestart, waarvan de data van elk jaar staat beschreven in aparte PTS-bestanden. Qinsy herkent deze bestanden volgens de X, Y, en Z-coördinaat waaruit ze zijn opgebouwd en zet ze om in afzonderlijke sounding grids.



Figuur 18 Sounding Grid 2011

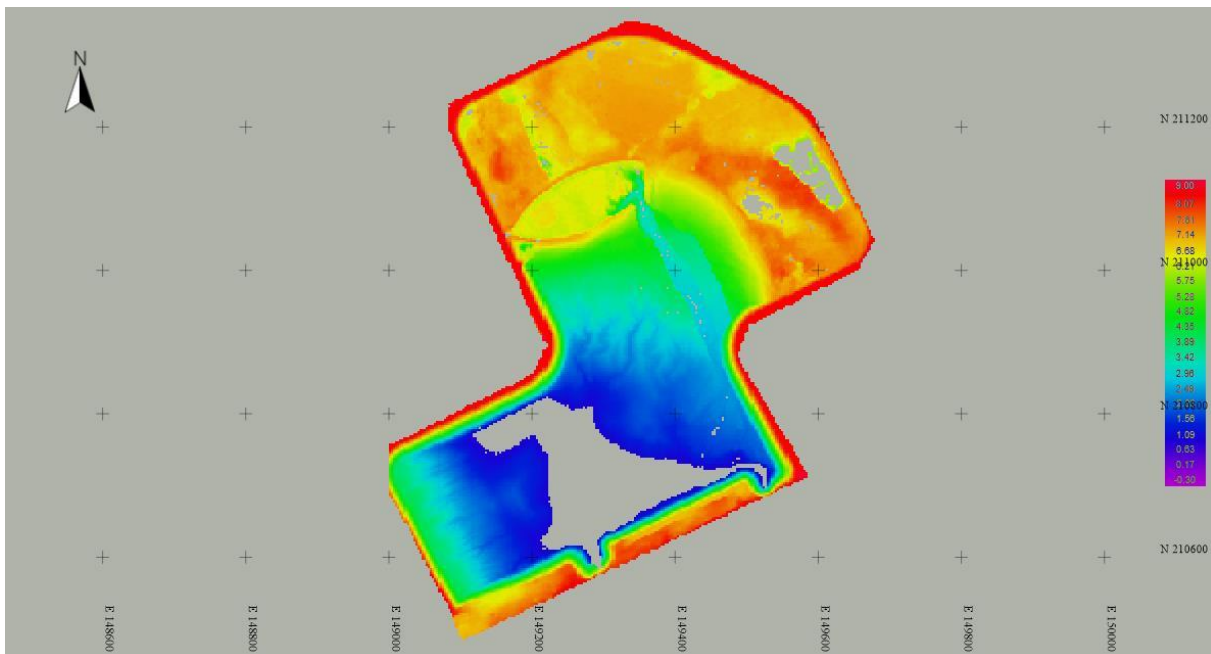
(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

Volume₂₀₁₁ = 1 224 615,88 m³.

Met de randen van het Burchtse Weel duidelijk weergegeven en circa 900 000 meetpunten verwacht men een volledig gevuld veld waar detail duidelijk merkbaar is. Doch ontbreken de gegevens onder ruwweg één meter TAW, gezien nergens paarse tinten worden weergegeven. Het is duidelijk dat de ontbrekende data de regio beslaat die gedurende die periode onder het wateroppervlak lag. 2011 is het jaar waar voor het eerst sinds lange tijd een korte getijdenwerking had plaatsgevonden waar er terug sediment is afgezet, maar dan zou dit duidelijk zichtbaar moeten zijn. De verklaring hiervoor berust, zoals reeds aangehaald, in het feit dat de metingen zijn verricht met een LiDAR scanner voor topografische doeleinden. De infrarode laser is niet in staat de bodem weer te geven, waar zelfs kleine plassen dieper dan enkele centimeters al kunnen zorgen voor ontbrekende data. Indien de metingen werden uitgevoerd bij hoogwater, is het moeilijk een beeld te vormen van het bodemprofiel, en kan dit bovendien toekomstige toenames beïnvloeden. Uit bevindingen in een rapport rond de waterstanden en sedimentatie in het Burchtse Weel (Smolders e.a., 2019) werd namelijk vastgesteld dat het niveau afgezet sediment in 2011 steeg met tot wel één centimeter per dag.

Het berekenen van het volume is mogelijk ondanks de ontbrekende meetpunten. Door een contour net aan de binnenkant van de rode markering te nemen, die het wandelpad voorstelt, bekomen we het meest waarheidsgetrouwe volume in deze omstandigheden. De berekeningen gebeuren automatisch na het invoeren van de grenzen volgens de eerder besproken triangulatie. De berekende waarde voor het volume geldt voor alle gedetecteerde meetpunten, dus in de realiteit ligt de waarde nog aanzienlijk hoger. Een exacte waarde is hier moeilijk te bepalen of zelfs te schatten, we weten immers niet hoe diep de ontbrekende punten gelegen zijn of wat de toestand van het bodemprofiel is.

Vervolgens gaan we de data van 2012 erbij nemen, die op dezelfde wijze als het vorige jaar verwerkt wordt en volgend resultaat geeft:



Figuur 19 Sounding Grid 2012

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

De gebruikte contour om het volume voor 2011 te berekenen, kan behouden worden. Dit zodat de vergelijking tussen de verschillende jaren op zo weinig mogelijk fouten berust.

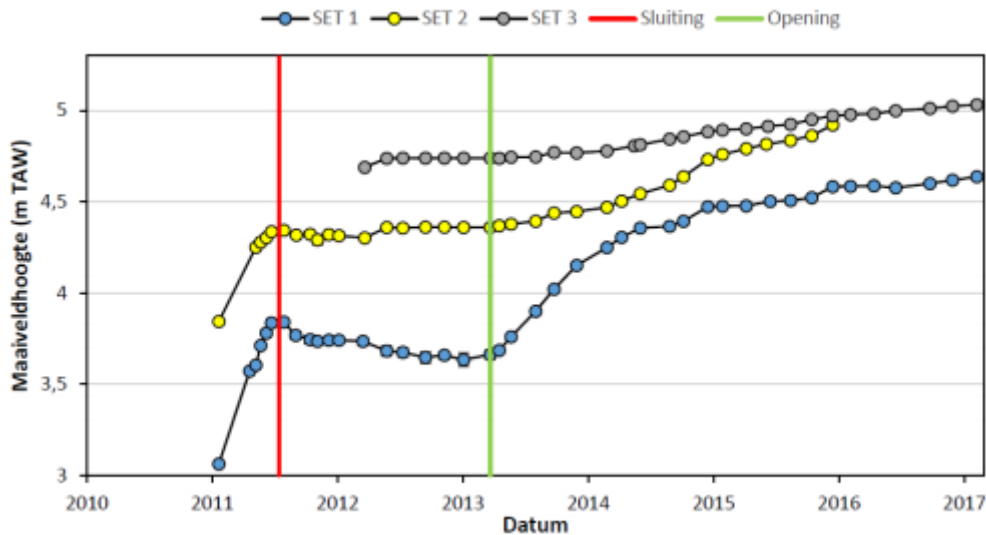
Volume ₂₀₁₂: 1 347 316,15 m³

Toename volume ₂₀₁₁₋₂₀₁₂: + 122 700,27 m³

Procentuele toename ₂₀₁₁₋₂₀₁₂: + 10,12%

Visueel zijn meteen duidelijke verschillen op te merken, zoals enigzins verwacht werd. Uit hetzelfde rapport van Smolders e.a. staat vermeld dat de getijpoorten tussen 15 juli 2011 en 22 maart 2013 continue gesloten zijn gebleven, na de constatering dat de afzetting van slib tot één centimeter per dag bedroeg. De stijging in het volume is dus te wijten aan sedimentatie die plaatsvond gedurende ruwweg een half jaar.

Onderstaande figuur uit het rapport van Smolders e.a. geeft een indicatie van het verloop van de hoogte van het grondniveau gerefereerd aan TAW, aan de hand van uitgevoerde SET (surface elevation table) metingen.



Figuur 20 SET metingen

(Bron: Smolders e.a., 2019)

De berekende stijging van het volume wordt gestaafd door de bevinden in het rapport, duidelijk zichtbaar op de grafiek vanaf de eerste opening tot de sluiting halverwege 2011.

We merken een stijgende trend op van 122 700,27 m³. Om dit voor de toekomstige alteraties qua volume in perspectief te zetten, zal er gebruik gemaakt worden van een benaderde dichtheid van het mengsel zand en slib om de volumes te kunnen weergeven als massa. Telkens zal ook het procentueel verschil in vergelijking met de oorspronkelijke toestand en de jaarlijkse toename aangehaald worden.

In een studie rond de rol van slib in de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde (Cleveringa & Dam, 2013) wordt in een rekenvoorbeeld aangehaald dat sediment in de Schelde bestaat uit een bepaald percentage puur zand gemengd met een resterend percentage fijn sediment (slib), onderscheiden door de omvang van de korrels in

micrometer. Het rapport gaat uit van 63 micrometer als bovengrens voor slibdeeltjes. De hypothese is gebaseerd op de relatie tussen de dichtheid van het mengsel en het gewichtspercentage slib in het mengsel. Als rekenvoorbeeld werden 1m^3 zand en 1m^3 fijn sediment (slib) vermengd, waaruit kon worden opgemaakt dat de massa van het fijne sediment 22,5% van de totale massa vertegenwoordigd. De massa van 100% puur zand kwam uit op 1550 kilogram, dat van het fijne sediment op 450 kilogram. Aan de hand van volgende formule werd volgens de studie door Mulder (1995) de dichtheid van het mengsel bepaald:

$$\rho_{\text{dry}} = 1550 - 17,5 \cdot p_{\text{fijn}} + 0.065 \cdot p_{\text{fijn}}^2$$

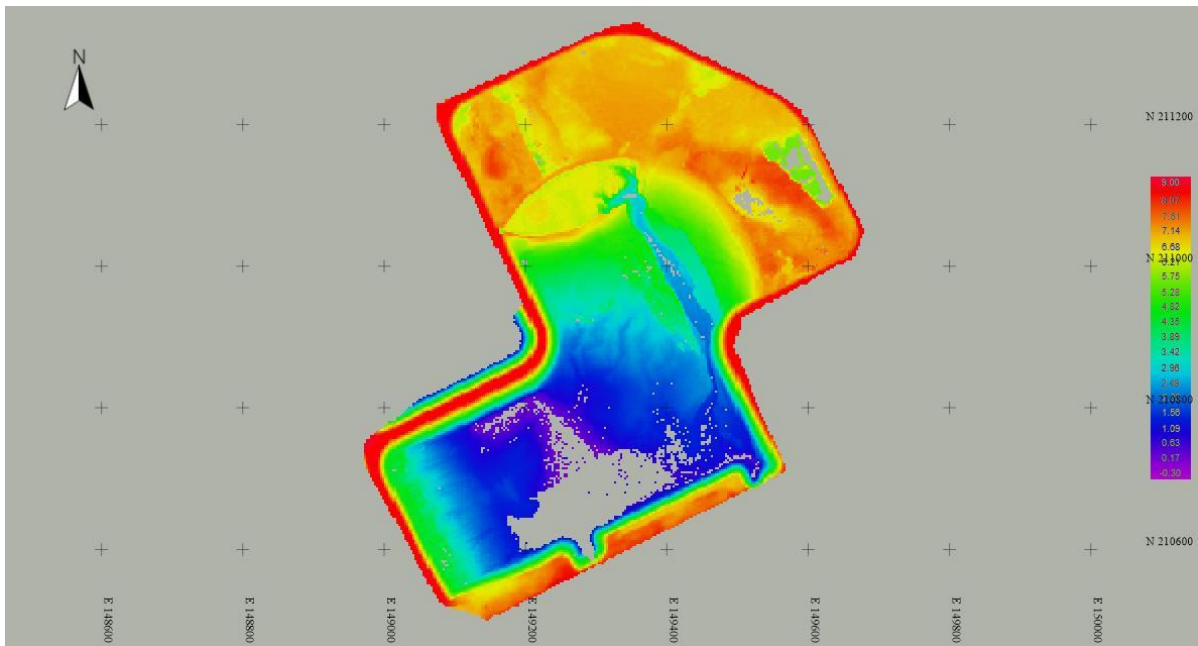
Waarbij p_{fijn} duidt op het gewichtspercentage fijn sediment. Na invullen van dit percentage werd de dichtheid van het mengsel vastgelegd op 1181 kg/m^3 .

Aanvankelijk kunnen we aannemen dat de gemiddelde dichtheid van het sediment in het Burchtse Weel niet deze exacte dichtheid bezit, maar eerder een benadering zal zijn om een indicatie te geven omtrent deze studie. Verschillende factoren hebben invloed op de dichtheid, die nog verder behandeld zullen worden. Als we deze dichtheid toepassen op de toename van het volume van 2011 tot 2012 bekomen we:

$$Massa_{2011-2012} = 1181 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 122\,700,27 \text{ m}^3 = + 144\,909,02 \text{ ton}$$

Deze aanzienlijke massatoename, verwezenlijkt door slechts een half jaar getijdenwerking is, ondanks de hypothese van de dichtheid, een indicatie van de snelle sedimentering die plaatsvond in de korte tijdspanne.

In 2013 zijn de getijpoorten opnieuw geopend en zouden we ook een duidelijk zichtbaar verschil moeten waarnemen:



Figuur 21 Sounding Grid 2013

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

Volume ₂₀₁₃: 1 352 678,02 m³

Toename volume ₂₀₁₂₋₂₀₁₃: + 5361,87 m³

Procentuele toename ₂₀₁₂₋₂₀₁₃: +0,4%

Visueel lijkt dit bevestigd te worden, de toename van sediment zorgt ervoor dat er minder water kan binnenstromen. Het bodemprofiel wordt zichtbaar en kenmerkt zich door een geleidelijk afnemende helling met de vorming van een centraal gelegen waterweg. Aan de oostelijke zijde snijdt het water zich dieper in in het hoger gelegen gebied, vermoedelijk veroorzaakt door de pompwerking van het bufferbekken.

We constateren verdere stijging van het volume, waarvan het verschil met de metingen van de vorige jaargang slechts 5361,87 m³ bedraagt.

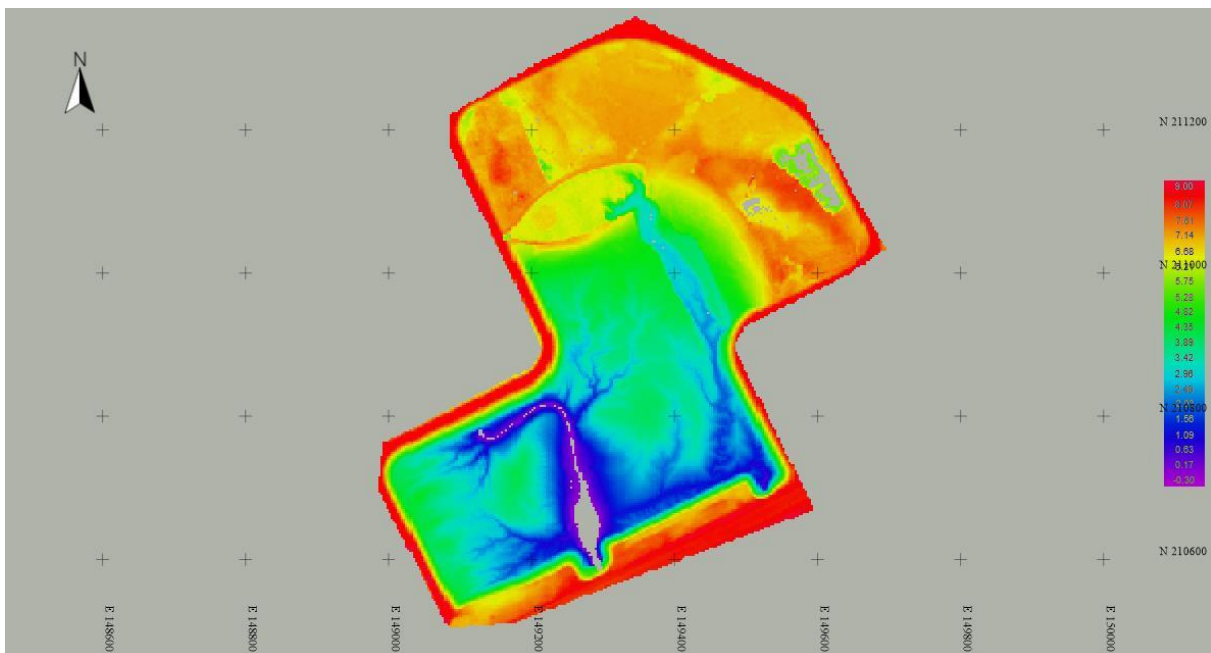
Tegenover de invloed van het waterniveau ten tijde van de metingen dat net besproken is, lijkt de aanvoer van sediment van 2012 tot 2013 slechts geringe invloed te hebben gehad. Er is anderzijds de mogelijkheid dat de LiDAR metingen van 2013 nog hebben plaatsgevonden voor de opening

van de getijpoorten, en het verschil te wijten is aan de stand van het waterniveau. De totale toename van het volume vergeleken met de oorspronkelijke toestand in 2011 bedraagt nu +10,46%. Indien we de berekende waarde van de studie gebruiken voor de massa van het sediment te berekenen voor 2012 tot 2013:

$$Massa_{2012-2013} = 1181 \frac{kg}{m^3} \cdot 6332,38 m^3 = + 6332,38 ton$$

De visuele vaststellingen vertalen zich alvast niet in de massa- en volumetoename. Indien de stijging effectief te wijten valt aan sedimentatie, valt dat op dit punt moeilijk te verklaren en zal het herbekeken worden relatief aan de hierop volgende resultaten.

We gaan verder met de gegevens van 2014. 2013 was het eerste jaar waar het Weel onder invloed was van een volledig jaar getijdenwerking. Toch was het daarop volgende resultaat onverwacht, met een miniscule stijging. Of de stijgende trend al dan niet is hernomen, wordt allereerst visueel benaderd.



Figuur 22 Sounding Grid 2014

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

Volume 2014: 1 510 280,55 m³.

Toename volume 2013-2014: + 157 602,53 m³

Procentuele toename 2013-2014: + 11,65%

Hier is meteen duidelijk dat een grote regio een toestroom van sediment te verwerken kreeg. Ongeveer een derde van het Burchtse Weel is, afgaande op het kleurenspectrum, circa één meter hogerop komen te liggen. Het water baant zich ook steeds dieper in het Weel door middel van kleine secundaire waterwegen die in detail zichtbaar worden. Het is alleszins duidelijk dat het afzetten van sediment nu aan een hoog tempo verloopt. Een grote oppervlakte in het centraal gedeelte heeft namelijk een drastische alteratie ondergaan tegenover 2013. Dit wordt bevestigd door de aangehaalde grafiek op pagina 54, die ook als bijlage is bijgevoegd. De laagst gelegen SET 1 metingen indiceren een sterke toename die gelinkt kan worden aan de berekende stijging.

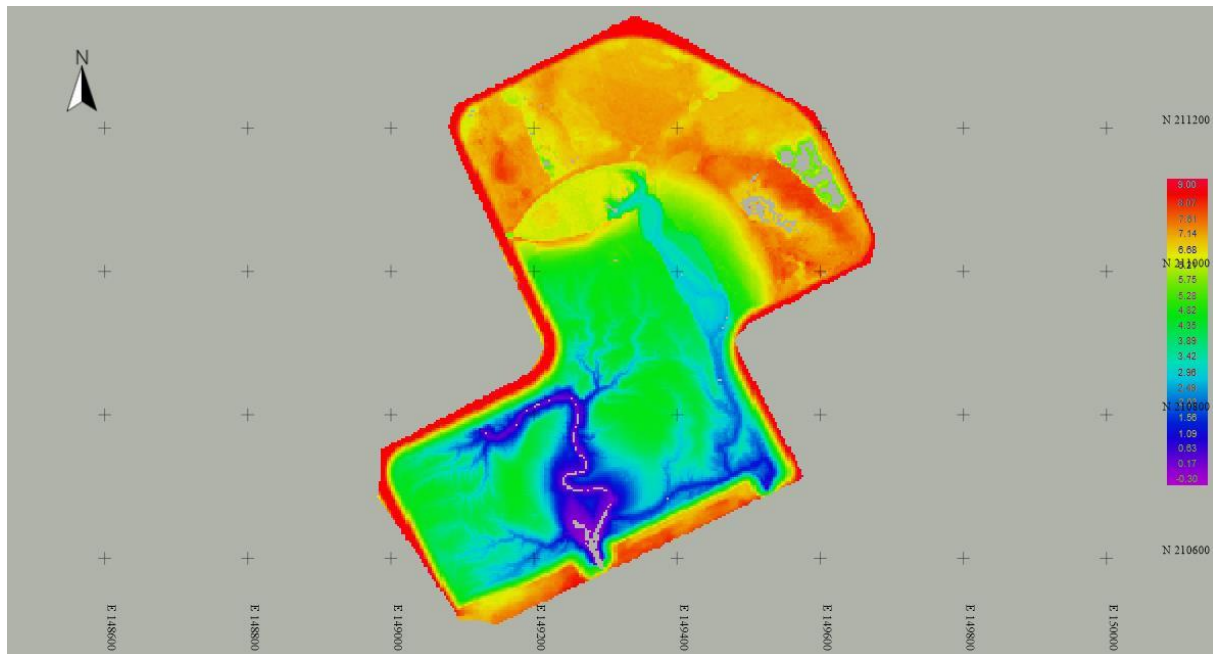
Het afzetten van sediment manifesteert zich voornamelijk naast de regio aan de getijpoorten, tot aan de terugslagklep waar gravitaire afwatering van het bufferbekken plaatsvindt en in de centraal gelegen regio. De toename in volume tegenover 2013 bedraagt 157 602,53 m³, tot zover de grootste stijging. Sinds het begin van de metingen in 2011, is het volume met 23,33% gestegen.

Tot slot valt er nog te bepalen hoeveel ton sediment er van 2013 tot 2014 is bijgekomen in het Weel. Voor de dichtheid hanteren we opnieuw 1181kg/m³ voor het mengsel zand en slib.

$$Massa_{2013-2014} = 1181 \frac{kg}{m^3} \cdot 157\,602,53\,m^3 = + 186\,128,59\,ton$$

Logischerwijs zet de volumetoename zich om in de hoogste massatoename tot nu toe. Het lijkt vanzelfsprekend ervan uit te gaan dat het op termijn steeds moeilijker zal worden om grote hoeveelheden

sediment te blijven afzetten om deze stijgende trend te onderhouden. Om deze stelling na te gaan, wordt de representatie van de data van 2015 eerst weer visueel onderzocht.



Figuur 23 Sounding Grid 2015

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

Volume 2015: 1 519 629,65 m³

Toename volume 2014-2015: + 9 349,1 m³

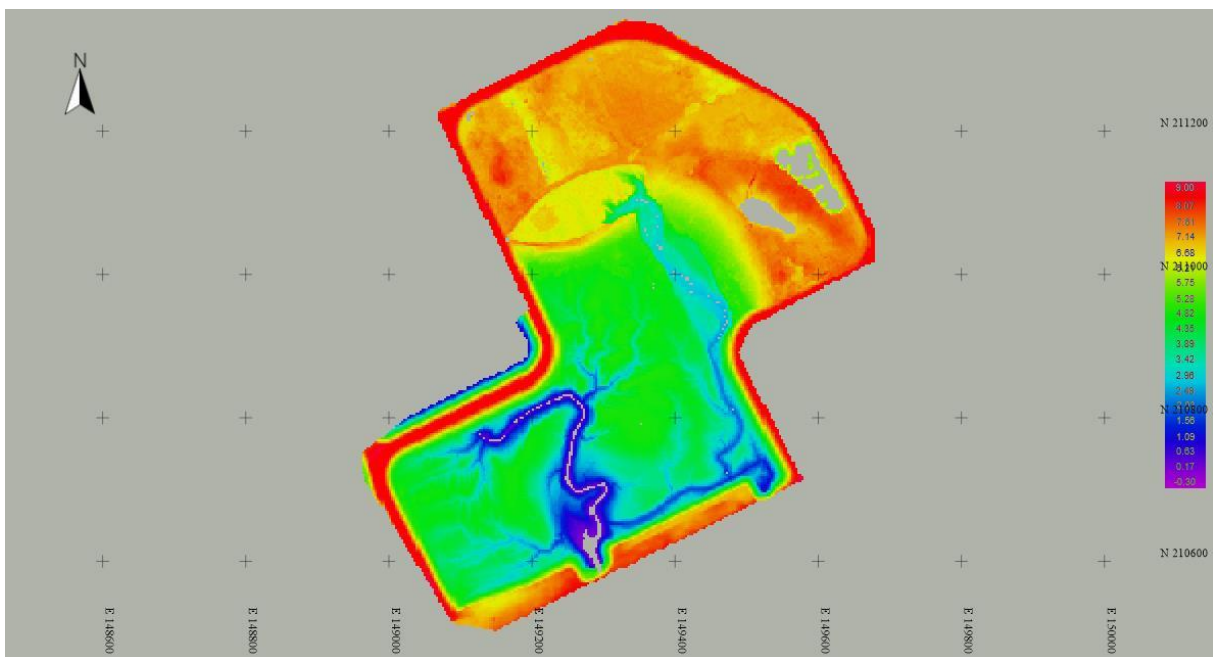
Toename 2014-2015 : + 0,62%

We constateren visueel geen grote veranderingen meer in vergelijking met de eerste jaren. De eerder ontstane secundaire waterwegen lijken zich te vullen met aangevoerd sediment en verdwijnen. De primaire waterweg, zichtbaar in het paars, wordt nu gekenmerkt door meerdere bochten en de algemeen gemeten gemiddelde hoogte stijgt. De nu meer gedetailleerde fysische veranderingen zijn merkbaar in de geringe volumetoename. De stijging van 0,62% komt overeen met volgende berekende massa:

$$Massa_{2014-2015} = 1181 \frac{kg}{m^3} \cdot 9349,1 m^3 = + 11\,041,29 \text{ ton}$$

Ditmaal is de zwakke stijging logischer, en deels voorspeld aan de hand van visuele vaststellingen.

Hoewel een stijging nu opnieuw enigzins binnen de verwachtingen ligt, is het zoals eerder vermeld duidelijk dat de afzetting van sediment steeds moeizamer kan verlopen als men vergelijkt met de beginjaren van de metingen. Van 2013 tot 2014 was er enorm veel ruimte waar nog water kon binnenstromen, en bijgevolg ook nog veel sediment kon worden afgezet. Op vier jaar tijd is praktisch een kwart van die ruimte opgevuld met sediment. De grafiek van de SET metingen bevestigt wederom deze cijfers, met een geringe stijging die enkel plaatsvindt op SET 2-niveau voor deze periode.



Figuur 24 Sounding Grid 2016

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

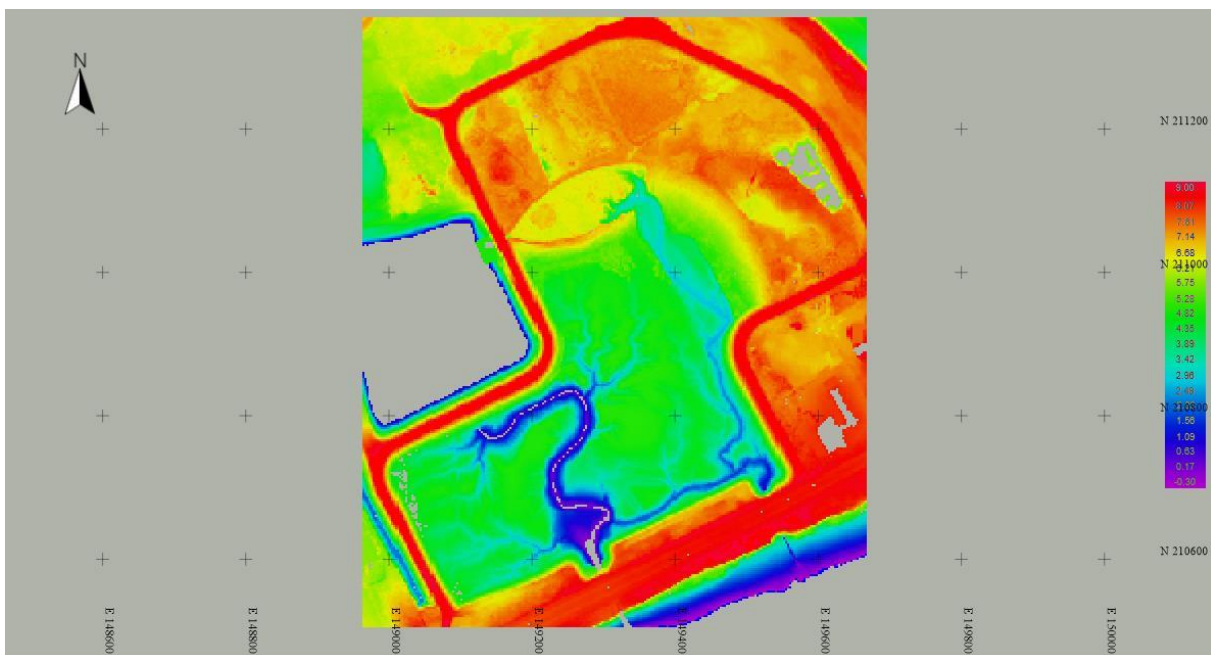
Volume₂₀₁₆: 1 640 760,09 m³

Toename volume₂₀₁₅₋₂₀₁₆: + 121 130,44 m³

Porcentuele toename 2015-2016: + 7,97%

Net als de primaire waterweg zelf, zijn vertakkingen ervan vernauwd of verdwenen. Het sediment stapelt zich op, wat het lokale hoogteverschil intensiveert. Hoewel de volumetrische toename aanzienlijk is, vertegenwoordigt deze een lager percentage. De beperkte beschikbare ruimte waar nog meer sediment kan afgezet worden speelt hier vermoedelijk een grote rol. Zoals de zien op de grafiek van de SET metingen, manifesteert het afzetten van sediment zich ook nu vooral ter hoogte van SET 2, hoger gelegen dan SET 1. Tot slot wordt de massatoename bepaald:

$$Massa_{2015-2016} = 1181 \frac{kg}{m^3} \cdot 121\,130,44 m^3 = + 143\,055,05 ton$$



Figuur 25 Sounding Grid 2017

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

Volume 2017 = 1 681 976,80 m³

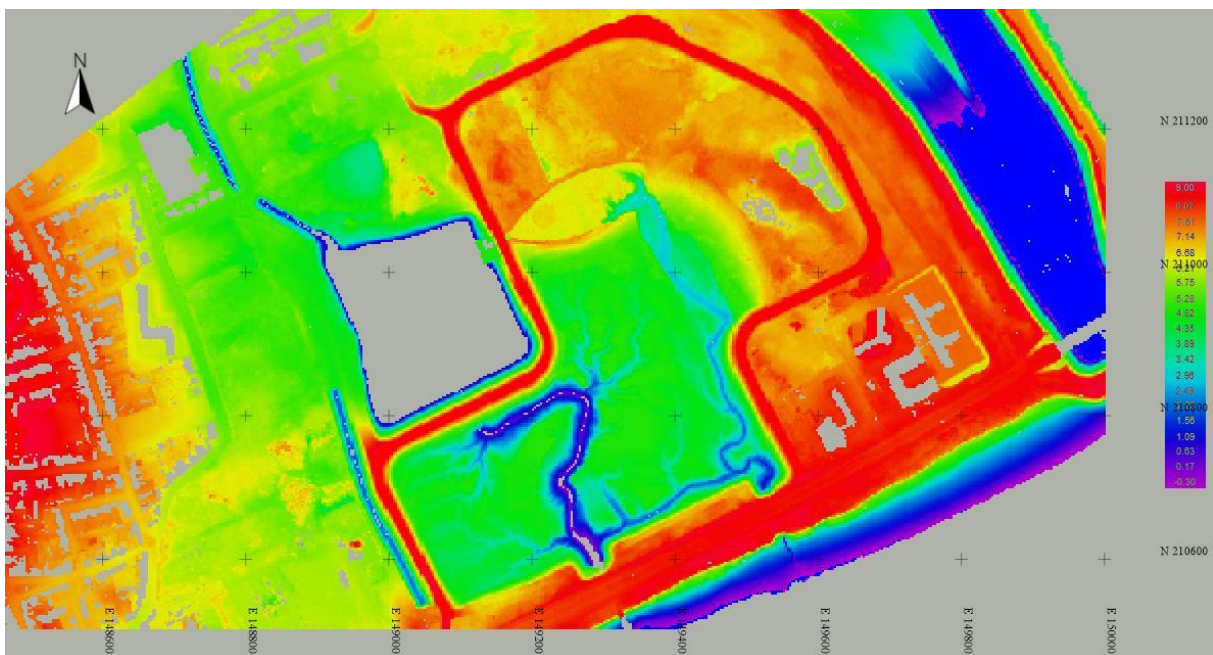
Toename volume 2016-2017: + 41 216,71

Procentuele toename 2016-2017: + 2,51%

De trend waarbij secundaire waterwegen verdwijnen zet zich voort van 2016-2017. De toename in volume is nog slechts een derde van de toename van de vorige jaargang. De relatief lage toename voldoet aan de verwachtingen. De volumetrische toename is met ruwweg 2/3 afgenomen in vergelijking met 2015-2016. Visueel vallen enkel nog de veranderingen op die het afwaterkanaal van het bufferbekken ondergaat. Tot slot wordt de massa van het aangevoerde sediment berekend:

$$Massa_{2016-2017} = 1181 \frac{kg}{m^3} \cdot 41\,216,71 m^3 = + 48\,676,93 ton$$

Sinds 2011 is het volume met 37,35% toegenomen. Verder lijkt een nieuwe forse volumetrische toename uitgesloten. De laatst beschikbare sounding grid ziet er als volgt uit:



Figuur 26 Sounding Grid 2018

(Bron: verwerkt van Quality Positioning Services B.V., 2020)

$$Volume_{2018} = 1\,720\,064,83 m^3$$

Toename volume 2017-2018: + 38 088,03 m³

Procentuele toename 2017-2018: + 2,26%

Hier is het visueel al duidelijk dat de primaire waterweg blijft vernauwen, de secundaire zelfs vernauwd tot ze bijna niet meer zichtbaar zijn. Het lijkt onmogelijk dat er dieper in het Burchtse Weel nog sediment wordt afgezet, waardoor nu ook de bovenste lagen opgevuld geraken. De veronderstelling dat de toename niet terug zou intensiveren klopt, met het op twee na laagste resultaat sinds het begin van de metingen. In totaal is het volume op zeven jaar tijd met 40,46% gestegen. Er rest enkel nog de toename in massa:

$$Massa_{2017-2018} = 1181 \frac{kg}{m^3} \cdot 38\,088,03\, m^3 = + 44\,981,96\, ton$$

8 Resultaten

Nu alle data verwerkt is, wordt naar een causaal verband gezocht aan de hand van een tabel en grafieken van de resultaten alsook eerder uitgevoerde studies en onderzoeken, die mogelijks beter inzicht bieden in de metingen.

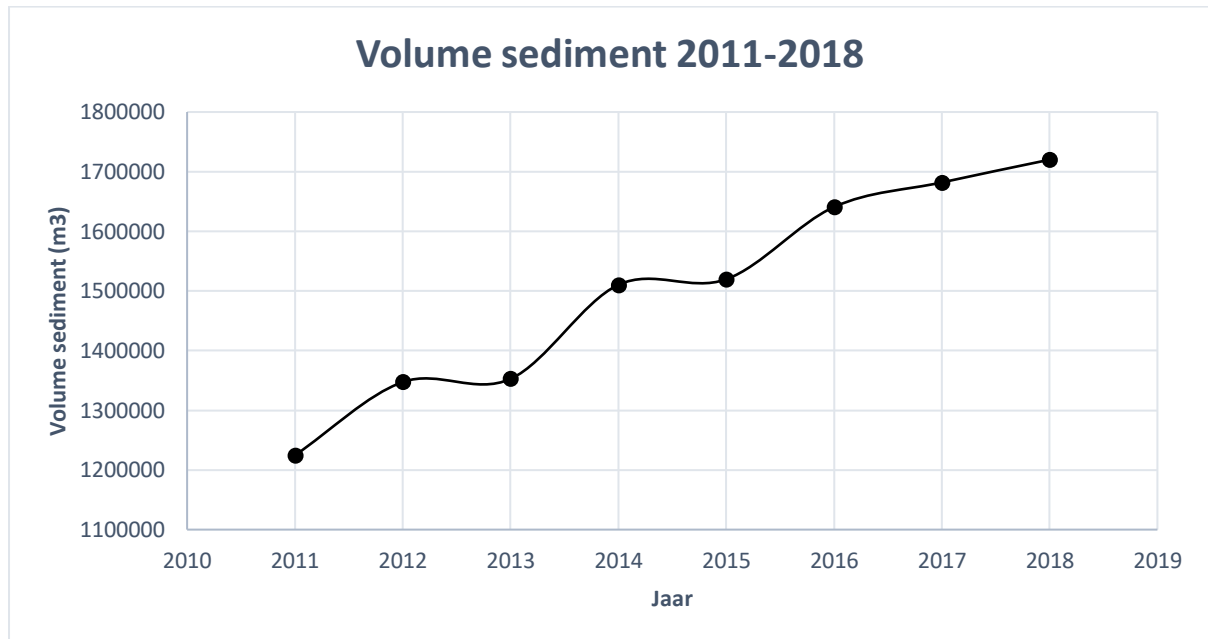
Tabel 4 Resultaten Sounding Grids

(Bron: eigen werk)

Jaar	Volume (m ³)	Procentuele toename (%)	Massatoename (ton)
2011	1 224 615,88	/	/
2012	1 347 316,15	+10,02	+144 909,02
2013	1 352 678,02	+0,4	+6332,38
2014	1 510 280,55	+11,65	+186 128,59
2015	1 519 629,65	+0,62	+11 041,29
2016	1 640 760,09	+7,97	+143 055,05
2017	1 681 976,80	+2,51	+48 676,93
2018	1 720 064,83	+2,26	+44 981,96

Grafiek 1 Volumetoename 2011-2018

(Bron: eigen werk)



Uit de tabel en grafiek gaan we niet meteen teveel concluderen, buiten dat dezelfde tendens zich tweemaal herhaalt. Tussen de jaren 2011 tot 2013, en 2014 tot 2016 vertoont de grafiek een soortgelijk patroon. Voor de laatste twee jaren neemt de grafiek een eerder lineair verloop aan. Toch is het herhaaldelijk patroon vermoedelijk te wijten aan toeval, gezien de aard van de studie. Vele factoren liggen aan de basis van de volumeveranderingen, waardoor het minder plausibel is dat er een zeker patroon zit in de afzetting van slib en zand in het Burchtse Weel.

Om de factoren aan te kaarten hanteren we opnieuw de studie omtrent de sedimentbalans in de Westerschelde van Cleveringa & Dam uit 2013. Daarin wordt aangehaald dat slib is opgebouwd uit kleinere sedimentdeeltjes, die overigens een lager soortelijk gewicht hebben en onregelmatiger qua vorm zijn. Het lager soortelijk gewicht van het slib zorgt voor een lagere valsnelheid waardoor het transport van slib zich aanzienlijk differentiëert dan dat van zand. De fijnere deeltjes waaruit het slib bestaat zijn ter hoogte van Antwerpen grotendeels afkomstig van mineralen door de erosie van Boomse klei, gemengd met een kleinere

fractie afkomstig van Ieperse klei uit de straat van Dover. Door de getijden bereiken de mineralen van de Ieperse klei de Beneden-Zeeschelde in kleinere hoeveelheden, waarbij het merendeel wordt afgezet in het Nederlands deel van de Schelde. De kleinere slibdeeltjes gedragen zich coherent, waardoor eroderen ook moeizamer verloopt eens de laag steviger wordt. Verder wordt beweerd dat hoe meer kleine slibdeeltjes het water bevat, des te lastiger het wordt het transport en sedimentatie te voorspellen. Bijgevolg komt het slib op andere plaatsen tot afzetting.

In 1986 maakte Manni slibbalansen op, duidend op het fijne sediment. Die slibbalansen omvatten de massa droge stof, tegenover sedimentbalansen die betrekking hebben op het volume. Manni berekende een gemiddelde permanente afzetting van 240 000 ton slib per jaar, met een minimum en maximum van respectievelijk 120 000 en 1 200 000 ton in de Beneden-Zeeschelde. De grote marge, die typerend is voor de opstelling van dergelijke balans, kan al dienen als duiding van willekeur in de meetresultaten.

Indien we deze resultaten toetsen aan de berekende massa's, valt op dat bijna de helft van die berekeningen boven het minimum liggen en enkelen zelfs het gemiddelde behalen van slibbalansen opgemaakt in 1986. Hieruit kan indirect afgeleid worden dat er de afgelopen jaren veel grotere hoeveelheden slib worden aangevoerd tegenover in 1986. De resultaten van Manni hebben tenslotte betrekking op de totale massa aangevoerd slib in de Beneden Zeeschelde, en niet op de massa die zich afzet in het Burchtse Weel. Het verschil is dat Manni enkel het slib, dus de fijne sedimentdeeltjes, in rekening bracht. Daar tegenover zijn de berekende massa's die zich in het Burchtse Weel afzetten een menging van zand en slib. Bovendien is de menging van zand en fijne slibdeeltjes geen vast gegeven, dat ook niet lineair verloopt. Het rekenvoorbeeld dat werd gehanteerd voor de massaberekeningen voor het Burchtse Weel is gebaseerd op het mengen van 1 m³ zand en 1 m³ slib. Na toepassen van

de gebruikte formule in de omgekeerde richting werd het volume vastgelegd op 1,69 m³ i.p.v. van 2 m³. Dit voorbeeld illustreert een volumeverschil van maar liefst 15%. In hoeverre zand en fijne deeltjes gemengd zijn is bijgevolg in grote mate bepalend voor het geobserveerde volume. In de Westerschelde werden bijvoorbeeld getijafzettingen gerapporteerd, opgebouwd uit discrete lagen van zand en slib. Vooral bioturbatie, de gravende activiteit van organismen, heeft een groot aandeel in de menging van zand en slib. (Cleveringa & Dam, 2013)

Zoals in bovenstaand voorbeeld werd aangehaald kan het verschil in volume aanzienlijk zijn afhankelijk van hoe zand en slib gemengd zijn. Voor de massaberekeningen die uitgevoerd zijn voor elke jaarloop, is telkens dezelfde dichtheid gehanteerd, bij gebrek aan informatie hieromtrent. Hier stelde de massa van het slib dat sedimenteerde steeds 22,5% van de totale massa sediment voor. Zoals reeds verklaard dienen deze cijfers, ondanks ze gemakkelijker te interpreteren zijn dan de volumes, eerder om de volumemetingen in perspectief te zetten.

Om te achterhalen hoezeer zand en slib al dan niet gemengd worden, wordt allereerst gekeken naar de omstandigheden waaronder de afzetting van sediment verloopt. Uit hetzelfde rapport omtrent de sedimentbalans werd bepaald dat volumeveranderingen van het slib o.a. bepaald zijn per diepteklasse. Slib sedimenteert sneller in de diepe delen van de Schelde, en erodeert gemakkelijker in ondiepere delen. Onder diep water wordt in het rapport een diepte <-5m NAP (Normaal Amsterdams Peil) verstaan. Gezien de getijpoorten die de Schelde verbinden met het Burchtse Weel zich volgens Smolders e.a. (2019) op ongeveer 0,6m boven TAW bevinden en NAP 2,33 meter boven TAW ligt ('Tweede Algemene Waterpassing', 2020), kunnen we stellen dat het slib ter hoogte van en rond de getijpoorten onderhevig is aan erosie. Door de hogere graad van erosie aan de ingang van de getijpoorten kunnen geërodeerde deeltjes tijdens vloed gemakkelijker getransporteerd worden in het Burchtse Weel

waar ze, al dan niet gemengd met zand, een ongeconsolideerde laag vormen.

Op basis van eerder verkregen data van De Looff (1978,1980) en McLaren (1994), heeft Van Ledden (2003) het slibgehalte in de bodem van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde geanalyseerd. Hij concludeerde dat het gemiddelde slibpercentage in de bodem in de Beneden-Zeeschelde meer dan dubbel zo hoog ligt als in de Westerschelde, 44% tegenover 16%. Dit resultaat is volgens Cleveringa & Dam waarschijnlijk te wijten aan de hogere graad van turbiditeit in de Beneden-Zeeschelde. Het gemiddelde percentage is bepaald aan de hand van 215 stalen, verspreid over de Beneden-Zeeschelde. Uit de metingen werd geconcludeerd dat het percentage slib zeer ongelijkmatig verdeeld is zonder enige regelmaat, wat bovenop de sedimentbalansen van Manni een bijkomstige factor is die willekeur in het geobserveerde patroon van de meetresultaten kan verklaren.

In 2015 heeft het Waterbouwkundig Laboratorium vervolgens turbiditeitsmetingen uitgevoerd op vraag van de stad Antwerpen, aangehaald door Smolders e.a. (2018), nadat snelle sedimentatie werd geconstateerd aan de pontons van het Steenplein. Op twee en tien meter onder het wateroppervlak werd de sedimentconcentratie gemeten. Een belangrijke bevinding is dat er slechts een klein verschil in concentratie werd gemeten op de verschillende dieptes. Het feit dat het sediment homogeen verdeeld is doorheen de waterkolom betekent dat het transport naar het Burchtse Weel ook in gelijkaardige concentraties kan verlopen, wat kan gelden als factor voor de forse toenames. Dit doet ook het vermoeden rijzen dat het percentage slib in het mengsel zand en slib mogelijks onderschat werd.

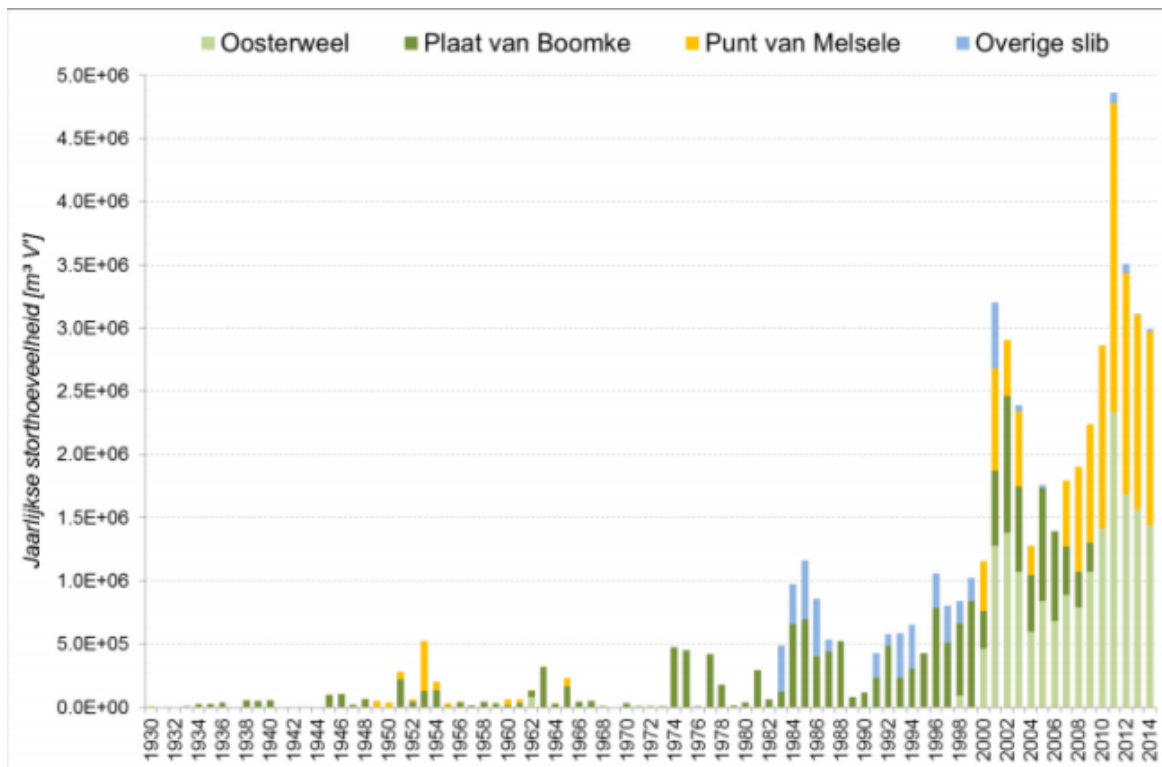
Hogere percentages slib die zich tussen de zandkorrels afzetten zorgen voor een toegenomen massa, iets wat niet kan worden waargenomen in de resultaten aangezien een vaste waarde wordt gehanteerd voor de

dichtheid van het mengsel zand en slib. De dichtheid van het mengsel slib en zand hangt niet lineair samen met het percentage fijn sediment in het mengsel. Dit omdat de stapeling van zand en fijn sediment niet constant verloopt. (Cleveringa & Dam, 2013)

Een belangrijke mogelijke factor die nog niet is aangehaald betreffende het transport van slib en de procentuele aanwezigheid ervan, zijn ingrepen door middel van baggeroperaties. We raadplegen hiervoor een deelrapport rond de Sedimentstrategie van de Beneden-Zeeschelde. (Plancke, Van Braeckel, Cox, Verwaest, & Mostaert, 2016)

Het rapport is opgesteld om een nieuwe sedimentstrategie te bepalen voor na december 2017. Er wordt gesteld dat tot die datum zanderige specie, dat voornamelijk gebaggerd wordt ter hoogte van de vaargeul, in het Deurganckdok en de toegangseuilen tot de verschillende sluisen, wordt teruggestort in de Schaar van Ouden Doel. Slibrijke specie wordt op meerdere locaties teruggestort: de Plaat van Boomke, Oosterweel, de Vlake van Hoboken en aan de Punt van Melsele. Uit het toetsen van de meetresultaten aan data van Manni uit 1986, kon de conclusie getrokken worden dat er meer slib en/of zand naar het Burchtse Weel wordt getransporteerd. Kortom, dat er meer transport is van slib in de Beneden-Zeeschelde.

Het rapport biedt een kijk in de bagger- en storthoeveelheden vanaf het begin van de werken. Voor de invloed van de baggerwerken aan de bathymetrische studie van het Burchtse Weel te linken, zijn vooral de storthoeveelheden interessant, op figuur 27.



Figuur 27 Jaarlijkse storthoeveelheden Schelde

(Bron: Plancke e.a., 2016)

Vanaf eind jaren 90 is een duidelijk exponentiële stijging waar te nemen in de storthoeveelheden op praktisch elke locatie, met uitzondering van de Plaat van Boomke. Vanaf 2010 zijn de voornaamste stortlocaties volgens de grafiek de Punt van Melsele en Oosterweel. Het 'huidige' stortregime, van voor december 2017, beschrijft de procentuele hoeveelheden en plaats waar de stortingen werden uitgevoerd alsook het tijdstip. De stortingen aan Oosterweel vonden plaats tussen hoogwater tot drie uur na hoogwater, en van drie uur na hoogwater tot laagwater. De stortingen aan de Punt van Melsele van laagwater tot drie uur na laagwater, en van drie uur na laagwater tot hoogwater. De stortlocaties zijn aangeduid op een figuur bijgevoegd als bijlage.

Aan de hand van modelresultaten werd bepaald dat meer stroomafwaarts storten leidt tot een stijging van de sedimentconcentratie in de stroomafwaartse delen, en een absoluut gezien grotere daling in de stroomopwaartse delen. Dit kan mede gestaafd worden door de

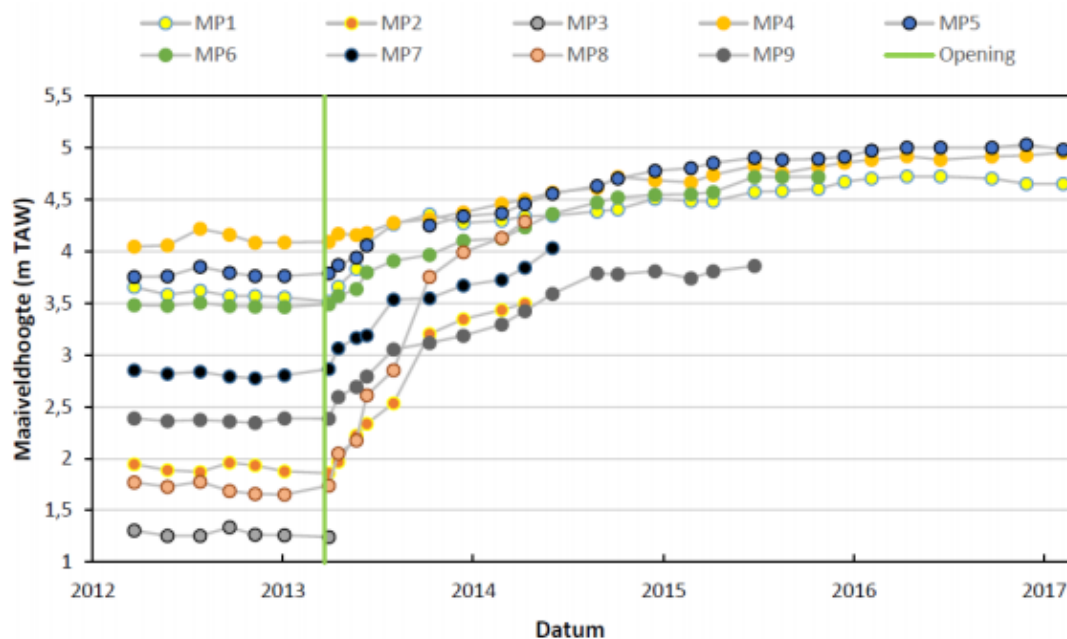
bevindingen van Cleveringa & Dam (2013) in het eerder aangehaalde rapport rond de sedimentbalans van de Westerschelde. Zij concludeerden dat er een netto positieve afzetting van zand en slib plaatsvindt van west naar oost, richting de Beneden-Zeeschelde. Door slibrijk sediment van onderhoudswerken aan bijvoorbeeld het Deurganckdok en andere toegangsheuvelen aan stortplaatsen meer stroomopwaarts in de Schelde te storten, is het meer dan aannemelijk dat er bijgevolg hogere slibconcentraties ontstaan meer stroomopwaarts in de Beneden-Zeeschelde. Deze bevindingen uit de twee rapporten kunnen zeker een rol spelen in de sedimentering in het Burchtse Weel. Een verdere verklaring voor het geobserveerde patroon in de toenames bieden deze bevindingen evenwel niet.

Momenteel de enige mogelijke verklaring voor de sterke toenames en fluctuerende resultaten voor de jaren 2011 tot 2014, is dat de sounding grids voor die jaren grote onbekende regio's onder het waterniveau bevatten, en het tijdelijk sluiten van de getijpoorten in die periode. Sediment kan onder de waterlijn in grote of kleine hoeveelheden aanwezig zijn geweest zonder dat die volumes mee in rekening werden gebracht. De laatste jaren is de invloed van de waterstand slechts gering en beschikken we over sounding grids waar het waterniveau een veel kleinere invloed heeft op de detectie van het bodemprofiel

Na de reikwijdte van de metingen tot en met 2018, beschikken wij verder niet over LiDAR data. Uit het rapport omtrent de waterstanden en sediment in het Burchtse Weel (Smolders e.a., 2019) wordt de situatie rond de sedimentering in het Burchtse Weel beschreven alvorens baggerwerken die in 2019 uitgevoerd zijn. De reden voor deze baggerwerken was, zoals geconcludeerd, de hoge graad van sedimentering die zich reeds gemanifesteerd had. Deze sedimentering bemoeilijkte de gravitaire afwatering van het bovengelegen waterreservoir waaruit afwatering van de Laarbeek verloopt. De baggerwerken die plaatsvonden in 2019 dienden enkel om de afwatering van het

bufferbekken te verzekeren. De vernauwing van de primaire waterweg werd reeds geconstateerd m.b.v. de sounding grids, waar vooral op de sounding grid van 2018 de vernauwing duidelijk zichtbaar is.

Uit hetzelfde rapport werd de conclusie getrokken dat de sedimentering in lagen plaatsvindt, progressief op een hoger niveau boven TAW naarmate de onderste lagen praktisch volledig gevuld geraken. Vanaf 2015 neemt de stijging van boven 5m TAW gestaag toe, en stagneert de stijging in de lager gelegen gebieden. Dit gegeven is eerder bevestigd aan de hand van de grafiek omtrent de SET resultaten. Op figuur 28 is ook te zien dat de maximale hoogte verkregen door meetpalen zich nog steeds onder gemiddeld hoogwater (5,30m TAW) bevindt voor die periode. (Smolders e.a., 2019)



Figuur 28 Gegevens meetpalen Burchtse Weel

(Bron: Smolders e.a., 2019)

Om na deze bevindingen een beeld te krijgen van de hedendaagse situatie, ben ik eind juli en begin augustus 2020 verscheidene keren langs het Burchtse Weel geweest om beelden en videomateriaal te maken. De figuren daarvan zijn te vinden in de bijlage. Daar is de voorgaande

stelling, dat de maximale hoogte nog onder het gemiddelde hoogwater ligt, niet meer geldig. De beelden bij hoogwater zijn gemaakt op 4 augustus 2020, bij een getij van $\pm 5,44\text{m TAW}$. Het afzetten van sediment in de hoogste lagen boven TAW heeft zich dus gestaag voortgezet sinds 2017, tot waar de gegevens van de meetpalen in figuur 28 reiken. Hieruit rijst het vermoeden dat toekomstige baggerwerken nodig zullen zijn om de gravitaire afwatering van de Laarbeek te blijven verzekeren, wat bevestigd wordt in datzelfde rapport door Smolders e.a..

Een laatste punt dat nog wordt besproken aan de hand van de resultaten is een analyse van bodemstalen die tijdens de baggerwerken van 2019 genomen werden. Op drie hoogtes boven TAW werden meerdere stalen genomen, waaruit bleek dat er nauwelijks een verschil is in korrelgrootte tussen de stalen genomen op lager en hoger niveau, die respectievelijk vroegere en recentere sedimentatie representeren. Aan de hand van de gemeten korrelgroottes werd bepaald dat het sediment in het Burchtse Weel voornamelijk uit slib is opgebouwd, gemengd met een kleiner aandeel fijn zand. (Smolders e.a., 2019) Een kleine berekening uit die gegevens wijst uit dat het sediment gemiddeld voor 67% uit slib bestaat. De eerder uitgevoerde berekeningen met betrekking tot de jaarlijkse massa aangevoerd slib zullen dus afwijken van de realiteit, en relatief gezien lager zijn als we de gebruikte formule opnieuw bekijken:

$$\rho_{\text{dry}} = 1550 - 17,5 \cdot p_{\text{fijn}} + 0.065 \cdot p_{\text{fijn}}^2$$

Indien we ervan uitgaan dat het fijne sediment nu een hoger percentage van het totale gewicht vertegenwoordigt dan voorheen, wordt steevast een lagere dichtheid verkregen. De kleinere korrelgrootte en het coherent gedrag van het fijne sediment zorgen voor meer compactie van het mengsel. Dit gegeven is verder moeilijk te bepalen gezien het percentage fijn sediment in het mengsel niet lineair verloopt met de uiteindelijke dichtheid.

9 Conclusies

Door de resultaten van de bathymetrische studie te analyseren aan de hand van bevindingen uit eerder uitgevoerde studies, zijn enkele zaken op de voorgrond getreden. Het uitgangspunt is dat het dichtslibben van het Burchtse Weel aan een bijzonder hoog tempo is verlopen, met een volumetrische groei van 40,46% relatief aan de oorspronkelijke toestand, gespreid over zeven jaar. Ondanks het jammere feit dat eigen metingen op het Burchtse Weel uiteindelijk niet mogelijk bleken, kon er toch voldoende praktisch onderzoek verricht worden met behulp van LiDAR data.

Het afzetten van sediment, waarvan $\pm 67\%$ slib, verloopt in lagen. De eerste lagen worden aan snel tempo opgevuld waarna het vullen van de toplagen relatief gezien trager verloopt, wat ook logisch is. Ondanks de gereduceerde toenames vanaf ruwweg 2017, werd door eenvoudige observatie aangetoond dat toenames op de bovenste lagen nog steeds gestaag verlopen. De fluctuatie qua toenames werd eerst verklaard door de grote marges die gegeven werden voor het afgezet slib in de Beneden-Zeeschelde. Gezien de gegeven marges enigszins gedateerd zijn (1986) en de massaberekeningen geen uitstekende referentie zijn, zijn er meer prominente factoren besproken die meer voor de hand liggen, zoals de invloed van het waterniveau op het aantal gedetecteerde meetpunten in combinatie met het sluiten van de getijpoorten gedurende een periode. De gegevens van 1986 zijn vooral interessant om de evolutie van de baggeroperaties sinds die periode te vergelijken en om de volumecijfers in perspectief te plaatsen door de massa te hanteren, ondanks de onnauwkeurigheden die ermee gepaard gaan.

Een vergelijking van enkele studies levert een kijk op de evolutie van het gedrag van slib in de Beneden-Zeeschelde. Alle onderzochte factoren oefenen mogelijks een invloed uit op de sedimentering, die samen ook voor een versterkt effect kunnen zorgen. De netto positieve afzetting van

slib en zand richting de Beneden-Zeeschelde in combinatie met gebaggerd slib dat opnieuw in de Schelde wordt gestort kan zich opnieuw verder transporteren, wat zorgt voor een hogere concentratie slib stroomopwaarts in de Schelde. De gelijkaardige gemeten slibconcentraties op verschillende waterdieptes kunnen hier mede gevolg van zijn, wat op zijn beurt een mogelijke oorzaak is voor het tempo van de sedimentatie alsook het hoge aandeel slib in het sediment dat wordt afgezet in het Burchtse Weel. Het lijkt hoe dan ook evident dat toekomstige baggerwerken nodig zullen zijn om de gravitaire afwatering van het bufferbekken te blijven verzekeren.

10 Bibliografie

An introduction to GNSS. (2015). (2nd edition.). Calgary, Alberta, Canada: NovAtel Inc.

Augustyn, A. (2020). Refractive index | Definition & Equation. *Encyclopedia Britannica*. Geraadpleegd 17 augustus 2020, van <https://www.britannica.com/science/refractive-index>

Biesemans, J., Horsten, W., Verbeke, B., Vanderstraete, T., Van der Linden, S., & Van Camp, N. (2010 september). Image Orthorectification and Image Mosaicking: Algorithm Theoretical Base and Validation - Figuur FLEPOS. *ResearchGate*. Geraadpleegd 12 augustus 2020, van https://www.researchgate.net/publication/262067280_Image_Orthorectification_and_Image_Mosaicking_Algorithm_Theoretical_Base_and_Validation

Brainard, J. (2020 laatst bewerkt). CK-12 Physical science for middle school. Geraadpleegd 17 augustus 2020 van <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-middle-school-physical-science-flexbook-2.0/section/16.5/primary/lesson/wave-amplitude-ms-ps>

Chart speed of sound with depth. Underwater sound channel—Figuur sound velocity profile. (2007, 1 augustus). Geraadpleegd van https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound

Christ, R., & Wernli Sr., R. (2013). *The ROV Manual (2nd Edition) A User Guide for Remotely Operated Vehicles*. Elsevier Ltd. Geraadpleegd van file:///C:/Users/gebruiker/Downloads/The_ROV_Manual_A_User_Guide_for_Remotely.pdf

Cleveringa, J., & Dam, G. (2013). *De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-*

estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Antwerpen, Rijkswaterstaat Waterdienst, Vlaamse Overheid, Afdeling Maritieme Toegang.

Datasheet LMS-Q680i. (2012, 28 september). RIEGL Laser Measurement Systems. Geraadpleegd van http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_LMS-Q680i_28-09-2012_01.pdf

De Vlaamse Waterweg NV. (2018). *Laseraltimetrische metingen (LiDAR) van de Zeeschelde afwaarts Wintam in het kader van de geïntegreerde monitoring van het Schelde-Estuarium (MONEOS-programma), uitgevoerd door EUROSENSE* (p. 12).

Depredomme, L. (2018, 5 september). Aanbeveling gebruik coördinatensystemen. Geraadpleegd 28 oktober 2019, van http://www.geopunt.be/~media/geopunt/voor-experts/documenten/aanbeveling_coordinatensystemen_publicatie.pdf

Difference Between GPS and DGPS. (2017, 21 oktober). *Tech Differences*. Geraadpleegd 5 april 2018, van <https://techdifferences.com/difference-between-gps-and-dgps.html>

Eguchi, G. (2005, 3 maart). *Delaunay Triangulations*. Geraadpleegd 3 augustus 2020, van <http://web.mit.edu/alexmv/Public/6.850-lectures/lecture09.pdf>

European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89). (2018). Geraadpleegd 24 juni 2020, van <https://confluence.qps.nl/qinsy/9.1/en/european-terrestrial-reference-system-89-etrs89-182618396.html>

European Terrestrial Reference System 1989. (2020, 3 februari). *Wikipedia*. Geraadpleegd 20 juni 2020, van

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=European_Terrestrial_Reference_System_1989&oldid=938953845

Google maps. (2018). Aerodata International Surveys, Maxar Technologies.

Grall, P., Kochanska, I., & Marszal, J. (2020). Direction-of-Arrival Estimation Methods in Interferometric Echo Sounding—Figuur critical depth. *ResearchGate*. doi:10.3390/s20123556

GRUP Oosterweelverbinding toelichtingsnota—Inrichtingsschets Burchtse Weel. (2006). Geraadpleegd 30 maart 2019, van https://www.antwerpen.be/docs/Stad/Stadsvernieuwing/Bestemmingsplannen/RUP_02000_212_00183_00001/RUP_02000_212_00183_00001_0066166Uitgangsprinc_tn.html

Guenther, G. C. (2004). AIRBORNE LIDAR BATHYMETRY - Figuur LiDAR principe.

How-to Qimera—Processing a Patch Test—Figuur patch test. (2018). Geraadpleegd 28 juli 2020, van <https://confluence.qps.nl/qimera/2.1/en/how-to-qimera-processing-a-patch-test-174096518.html>

How-to Singlebeam Settings—Qinsy—Figuur pitch angle. (2018). Geraadpleegd 20 juni 2020, van <https://confluence.qps.nl/qinsy/8.0/en/how-to-singlebeam-settings-162529457.html>

Hulpmiddelen voor transformatie van coördinaten. (2020). *NGI*. Geraadpleegd 3 augustus 2020, van <https://www.ngi.be/website/hulpmiddelen-voor-transformatie-van-coordinaten/>

INBO. (z.d.). Slikken en schorren. Geraadpleegd 5 mei 2018, van <https://www.inbo.be/nl/thema/soorten-biotopen/biotopen/slikken-en-schorren>

Kaarten Geopunt. (z.d.). Geraadpleegd 13 mei 2018, van <https://www.geopunt.be/>

Kashani, A. G., Olsen, M. J., Parrish, C. E., & Wilson, N. (2015). A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration - Figuur LiDAR refractie. *Sensors*, *15*(11), 28099–28128. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/s151128099

Kudowor, A. Y. T., & Taylor, G. (z.d.). Triangulation Based Volume Calculation. Geraadpleegd 25 maart 2020, van <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.138.8783&rep=rep1&type=pdf>

Lambert 2008. (2020). Geraadpleegd 15 mei 2020, van <https://www.geopunt.be/voor-experts/lambert-2008>

Lambertcoördinaten. (2013). Nationaal Geografisch Instituut. Geraadpleegd 10 april 2020, van <http://www.ngi.be/NL/NL2-1-4.shtm>

Lambertcoördinaten. (2020, 30 april). *Wikipedia*. Geraadpleegd 20 juni 2020, van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Lambertco%C3%B6rdinaten&oldid=56177433>

Lambot, P. (2013). Waterpassingsnetten. Nationaal Geografisch Instituut. Geraadpleegd 15 april 2020 van <http://www.ngi.be/Common/articles/G/waterpassingsnetten.pdf>

LiDAR UK. (2020). Geraadpleegd 5 augustus 2018, van <http://www.lidar-uk.com/index.php>

Lievens, L. (2019). *Introduction Hydrography*. DEME Group, Antwerpen.

Manni, R. J. (1986). *Slibtransport en slibbalans in de Westerschelde*. Rijkswaterstaat, Vlissingen.

Motion Reference Units (MRU) information. (2020). Geraadpleegd 9 mei 2020, van https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/orientation_position_sensing/motion_reference_units_mru

Mulder, H. P. J. (1995). *De droge dichtheid als functie van het slibgehalte t.b.v. Een sedimentbalans*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat Rijkswaterstaat RIKZ.

Natuurwandeling Burchtse Weel. (z.d.). *Natuurpunt*. Geraadpleegd 12 mei 2018, van <https://www.natuurpunt.be/agenda/natuurwandeling-burchtse-weel-12551>

Nieukirk, S. (2015, 6 april). Understanding Ocean Acoustics. Geraadpleegd 23 juli 2020, van <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/sound01/background/acoustics/acoustics.html>

NOAA. (2018, 25 juni). What is bathymetry? Geraadpleegd 20 juni 2020, van <https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html>

NOAA. (2019, 13 november). What is a thermocline? Geraadpleegd 3 juni 2020, van <https://oceanservice.noaa.gov/facts/thermocline.html>

Olson, E. (2018, 30 oktober). How Does GPS Work? | Engineering360—Figuur trilateratie. Geraadpleegd 3 augustus 2020, van <https://insights.globalspec.com/article/10315/how-does-gps-work>

Oosthoek 1916. (2018, 13 december). Dieplood—De betekenis volgens Oosthoek 1916. Geraadpleegd 20 juni 2020, van <https://www.ensie.nl/oosthoek1916/dieplood>

Opnieuw getijdenwerking in Burchtse Weel. (2013). Geraadpleegd 28 april 2018, van <http://www.bamnv.be/opnieuw-getijdenwerking-in-burchtse-weel/>

Plancke, Y., Van Braeckel, A., Cox, T., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2016). *Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 8—Samenvatting. Versie 4.0. WL rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium, Antea Group, INBO en Universiteit Antwerpen: Antwerpen, België*. Geraadpleegd van <https://www.vnsc.eu/uploads/2016/06/wl2016r14-025-8-samenvatting.pdf>

QPS - Maritime software solutions. (z.d.).QPS. Geraadpleegd 15 april 2018, van <https://qps.nl/>

Quality Positioning Services B.V. - Sounding Grids Qinsy. (2020). Geraadpleegd van <https://qps.nl/qinsy/>

Real Time Kinematics. (2011). Geraadpleegd 15 juli 2018, van https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Real_Time_Kinematics

Ronsyn, J. (2018, 10 december). Pompinstallaties. Geraadpleegd 17 februari 2019, van <https://www.provincieantwerpen.be/aanbod/dlm/dienst-integraal-waterbeleid/projecten/pomptinstallaties.html>

Shallow Water Single Beam Surveying Concepts. (z.d.). CEE HydroSystems. Geraadpleegd 17 augustus 2020, van http://www.ceehydrosystems.com/wp-content/uploads/2015/12/Survey_Notes-Surveying_Concepts.pdf

Smolders, S., Plancke, Y., & Mostaert, F. (2019). *Burchtse Weel: Waterstanden en sediment: Toestand 2018*. Versie 3.0 (p. 21). Antwerpen, Waterbouwkundig laboratorium. Geraadpleegd 9 augustus 2020, van file:///C:/Users/gebruiker/Downloads/WL2019R19_026_1.pdf

Snell's law. (2020). *Www.physicsclassroom.com*. Geraadpleegd 22 juni 2020, van <https://www.physicsclassroom.com/class/refrn/Lesson-2/Snell-s-Law>

Sulaiman, S. A. hj, Nursyahirah, N., Kamaluddin, H. T., Mat Akhir, M. W., & Othman mohd, Y. (2016). Deriving Orthometric Height Using Global Geopotential Models (GGMs)—Figuur verband tussen geoïde en ellipsoïde. *ResearchGate*. doi:10.1109/ICSGRC.2016.7813326

Teledyne Odom Hydrographic. (2012, 11 april). Hydrotrac 2 user manual. Teledyne Odom Hydrographic.

The Angle of Refraction. (2020). *www.physicsclassroom.com*. Geraadpleegd 22 juni 2020, van <https://www.physicsclassroom.com/class/refrn/Lesson-2/The-Angle-of-Refraction>

Transformation et conversion de Coordonnées. (2017). Nationaal Geografisch Instituut. Geraadpleegd 13 april 2020, van http://www.ngi.be/Common/Lambert2008/Schema_Lambert_1972_2008_nl.pdf

Tweede Algemene Waterpassing. (2020, 22 april). *Wikipedia*. Geraadpleegd 28 juli 2020, van https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Tweede_Algemene_Waterpassing&oldid=56123054

van der Velden, R., Lekkerkerk, H.-J., Roders, J., Theijs, M.-J., de Vries, R., van Dam, A., & Haasnoot, H. (2012). *Handbook of offshore surveying Volume 3* (2nd edition.). AC Voorschoten, Nederland: Skilltrade.

Van Ledden, M. (2003). *Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins*. (Delft University of Technology, Delft).

Voet, P. (2012). GNSS netwerken in België. Nationaal Geografisch Instituut. Geraadpleegd 12 april 2018, van <https://fdocuments.nl/document/rtk-netwerken-in-belgie.html>

Waters, K. (2013, 25 september). Bathy Lidar: Harder Than It Looks. *Digital Coast GeoZone*. Geraadpleegd 21 juni 2020, van <https://geozoneblog.wordpress.com/2013/09/25/bathy-lidar-harder-than-it-looks/>

Yang, C. E. (2016, 16 september). What is the Piezoelectric Effect? *Electronic Design*. Geraadpleegd 20 juni 2020, van <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21801833/what-is-the-piezoelectric-effect>

Lijst van bijlagen

- | | |
|-----------|---|
| Bijlage A | SET metingen Burchtse Weel |
| Bijlage B | Stortlocaties Beneden-Zeeschelde (weergegeven als groene polygonen) |
| Bijlage C | Figuren hedendaagse situatie Burchtse Weel |

Bijlagen

Bijlage A SET metingen Burchtse Weel

