

Notitie

**Aan**

Maarten Bruggeman (Typhoon Offshore)

**Van**

Christ de Jong & Bas Binnerts

**Kopie aan**

Floor Heinis (HWE)

**Onderwerp**

Berekeningen onderwatergeluid voor heiwerkzaamheden Offshore Windpark Gemini (projectnr. 052.04146)

**Technical Sciences**

Oude Waalsdorperweg 63  
2597 AK Den Haag  
Postbus 96864  
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 00

F +31 70 328 09 61

infodesk@tno.nl

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**E-mail**

christ.dejong@tno.nl

**Doorkiesnummer**

+31 88 866 80 34

**Doorkiesfax**

+31 88 866 65 75

## 1 Inleiding

In opdracht van Typhoon Offshore is een schatting gemaakt van het onderwatergeluid zoals dat mogelijk op zal treden tijdens de heiwerkzaamheden voor de offshore windturbines in de Gemini offshore windparken.

Dit memorandum beschrijft de aanpak en geeft de resultaten van de berekeningen in de vorm van onderwatergeluidkaarten en grafieken, waarin de totale geluidbelasting gedurende het heien voor één paal is weergegeven. De berekende geluidbelasting wordt vergeleken met op dit moment beschikbare grenswaarden waarboven het geluid effect zou kunnen hebben op bruinvissen en zeehonden.

Bij het beoordelen van de berekende effectafstanden dient rekening gehouden te worden met de vele onzekerheden in berekeningen en grenswaarden. De berekeningsresultaten geven een indicatie van de orde van grootte van de afstanden tot de heipaal waarop het onderwatergeluid kan leiden tot vermijdingsgedrag of fysiologische effecten.

## 2 Inhoud

- 1 Inleiding
  - 2 Inhoud
  - 3 Aanpak
  - 4 Bronsterkte van het heigeluid
  - 5 Heiscenario
  - 6 Omgevingsparameters
  - 7 Drempelwaarden voor effecten op bruinvissen en zeehonden
  - 8 Berekeningen en resultaten
  - 9 Onderwatergeluidkaarten (vermijdingsgedrag bij bruinvis en zeehond)
  - 10 Cumulatieve blootstelling (TTS en PTS bij bruinvis en zeehond)
  - 11 Onzekerheden
  - 12 Conclusie
  - 13 Referenties
- A Schaal voor de ernst van gedragsbeïnvloeding [Southall et al 2007]
  - B Geluidverspreidingskaarten (enkele klap)
  - C Geluidverspreidingsgrafieken (cumulatief)

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

2/24

### 3 Aanpak

De onderwatergeluidkaarten zijn gemaakt met behulp van de huidige versie van het TNO rekenmodel AQUARIUS, dat is gebaseerd op de benaderingsmethode die is beschreven in [Weston 1971, 1976]. Dit model berekent de ruimtelijke verspreiding van het geluid, op basis van gegevens over de geluidbron, de bathymetrie, het sediment en de windsterkte.

De 'Ad-hoc European working group on Terminology for Underwater Sound' [AETUS 2011] kwam in 2011 tot de conclusie dat het waarschijnlijk niet mogelijk is om een bruikbare definitie van een akoestische bronniveau ('Source Level') van offshore heiwerkzaamheden te formuleren. De modellering van de onderwatergeluidverspreiding bij offshore heiwerkzaamheden is nog in ontwikkeling. Het onlangs door TNO ontwikkelde hybride model [Zampolli 2013] waarmee het heigeluid wordt berekend uit gedetailleerde gegevens van heipaal, heihamer en omgeving is nog niet gereed en heeft nog nadere validatie.

Om toch een schatting van de geluidverspreiding te kunnen geven nemen we hier voorlopig aan dat we het Aquarius-model kunnen gebruiken om het geluidveld vanuit de bestaande meetdata op afstand van de paal te extrapoleren naar grotere afstanden. Hoewel het Aquarius-model nog niet experimenteel gevalideerd is voor de geluidverspreiding van heigeluid over afstanden groter dan ca. 5 km (de maximale meetafstand in [de Jong & Ainslie 2012]), levert dit model naar verwachting een realistischer schatting van de geluidverspreiding dan modellen die geen rekening houden met de frequentie van het geluid, de bathymetrie, het sediment en de windsterkte.

### 4 Bronsterkte van het heigeluid

Het Gemini park is verdeeld over twee locaties:

1. *ZeeEnergie* (lokale waterdiepte ca. 34 m)
2. *Buitengaats* (lokale waterdiepte ca. 30 m)

De definitieve gegevens over het heiproces (type hamer, slagenergie) voor de monopiles zijn op dit moment nog niet bekend. Uit 'drivability' studies van hamerfabrikanten (gegevens ter beschikking gesteld door Typhoon Offshore) volgt dat de benodigde slagenergie voor het heien waarschijnlijk maximaal 1900 kJ per slag zal bedragen. Er zijn naar schatting maximaal 5000 klappen nodig per paal.

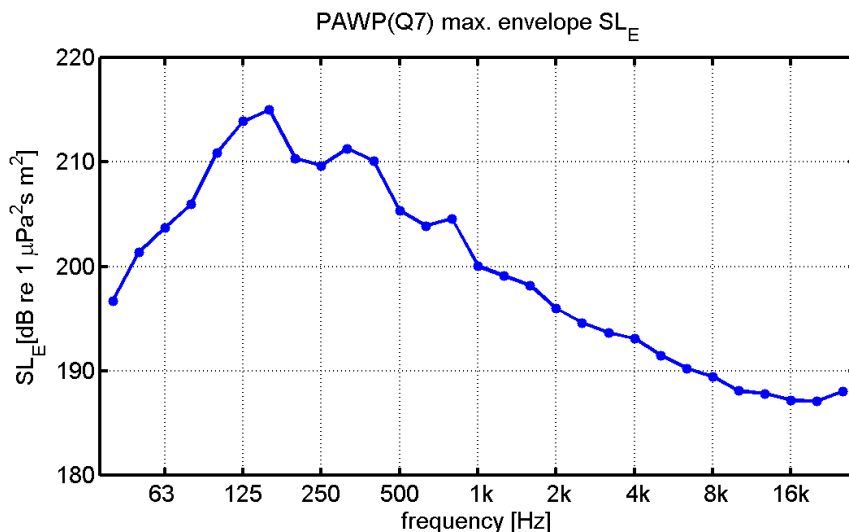
We gaan er van uit dat het heigeluid zoals gemeten bij het Prinses Amaliawindpark (Q7) [de Jong & Ainslie 2012] als uitgangspunt gebruikt kan worden voor een schatting van de bij het heien opgewekte onderwatergeluidenergie. Met behulp van het Aquarius model is in [Ainslie et al 2012] een schatting gemaakt van het propagatieverlies PL van het geluid van een puntbron, midden in de waterkolom op de heilocatie, naar de verschillende meetlocaties voor Q7 (21 m waterdiepte, 'medium sand' sediment, 4,5 m/s wind op 10 m hoogte). Door het berekende propagatieverlies (PL) bij de gemeten geluidbelasting (SEL) op te tellen is een schatting gemaakt van de spectra van een energiebronsterkte  $SL_E = SEL + PL$  [TNO 2012] per heiklap voor de verschillende meetpunten. De maximale 'envelope' van deze schattingen (Figuur 1) wordt hier gebruikt als input voor de Aquarius berekening van de geluidverspreiding bij het heien voor de Gemini parken. De over de frequentiebanden

gesommeerde  $SL_E$  per heiklap is 221 dB re  $1 \mu Pa^2 s m^2$ . De laagste schattingen van de  $SL_E$  uit de diverse meetpunten bij Q7 is 215 dB re  $1 \mu Pa^2 s m^2$ .

**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
3/24



**Figuur 1** Geschatte bovengrens voor het energie bronniveau spectrum (1/3-octave) voor het heigeluid, gebaseerd op de meetresultaten van Q7 (zie de tekst).

Aannemend dat een vast percentage van de klapenergie wordt omgezet in geluidenergie, zou het energiebronniveau bij een veronderstelde klapenergie van 1900 kJ, voor de grotere paaldiameter bij Gemini, 4 dB groter<sup>1</sup> zijn dan het Q7 bronniveau. Bij gebrek aan meetgegevens nemen we voorsnog aan dat de spectrale verdeling niet verandert.

## 5 Heiscenario

Voor de berekening van de cumulatieve blootstelling gaan we uit van een realistisch heiscenario, zoals opgesteld in overleg met Typhoon Offshore.

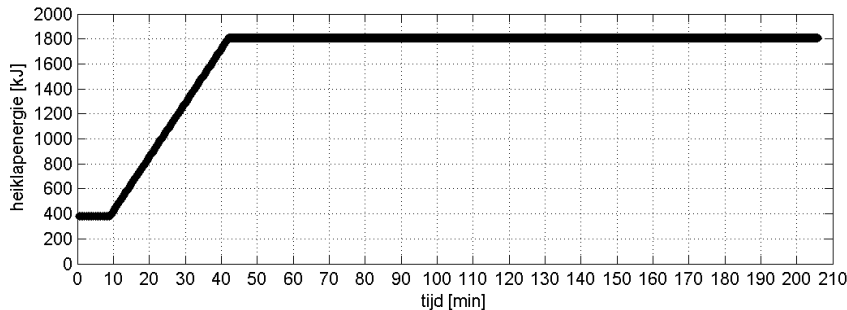
Figuur 2 toont het scenario. Gestart wordt met een periode van ca. 10 minuten waarin de paal goed gepositioneerd wordt. Hierbij wordt op laag energieniveau (20% van het volle vermogen) bij een lage klapfrequentie (2 klappen per minuut) geheid. Na deze periode wordt de hei-energie bij dezelfde klapfrequentie in een periode van circa 30 minuten opgevoerd tot maximaal 90% van het volle vermogen (1900 kJ). Daarna wordt continu door geheid bij een heifrequentie van 30 klappen per minuut tot de paal de gewenste diepte heeft bereikt, na een totaal van 5000 heiklappen.

<sup>1</sup> Een toename van de energie met een factor 1900/800 komt overeen met een toename van het energieniveau met  $10 \log_{10}(1900/800) \approx 4$  dB.

**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
4/24



**Figuur 2** Scenario voor het verloop van de klapenergie als functie van de tijd gedurende het heien.

## 6 Omgevingsparameters

De geluidverspreiding is in eerste instantie uitgerekend voor scenario's waarbij uit voorzorg waarden van omgevingsparameters zijn gekozen die leiden tot een reële overschatting van het geluid. Deze parameters zijn samengevat in Tabel 1. De onzekerheden in de modellering worden besproken in §11.

Waterdiepte bij heipaal	33,6 m c.q. 29,5 m
Bodem type [Ainslie 2010]	'medium sand'
Bodem geluidssnelheid	1785 m/s
Bodem dichtheid	2086 kg/m <sup>3</sup>
Bodem absorptie	0,88 dB/golflengte
Zeewater geluidssnelheid	1490 m/s
Zeewater dichtheid	1000 kg/m <sup>3</sup>
Windsnelheid (10 m hoogte)	0 m/s c.q. 7,5 m/s

**Tabel 1** omgevingsparameters voor de propagatieberekeningen

Wind boven zee verstoort het wateroppervlak, waardoor geluid verstrooid en geabsorbeerd wordt. Daardoor neemt het propagatieverlies toe bij toenemende windsnelheid. Dat effect is vooral merkbaar bij windsnelheden (op 10 m boven het wateroppervlak) groter dan 3 tot 4 m/s. Bij de berekening van de geluidverspreiding wordt daarom uitgegaan van twee windsnelheden:

- i. 0 m/s, als 'worst case';
- ii. de gemiddelde windsnelheid in de maanden juli, augustus en september (de beoogde hei-maanden) op de beoogde planlocatie. Voor de Gemini parken is deze gelijk aan 7,5 m/s.

## 7 Drempelwaarden voor effecten op bruinvissen en zeehonden

De berekening van de geluidverspreiding heeft als doel in te kunnen schatten hoeveel bruinvissen en zeehonden effecten kunnen ondervinden van de geluidbelasting tijdens het heien. Dat aantal hangt samen met het voorkomen van dieren binnen een afstand tot de heipaal waarbinnen het blootstellingsniveau een drempelwaarde overschrijdt waarbij die effecten mogelijk optreden. In dit memorandum beperken we ons tot de berekening van die afstand.

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

5/24

In navolging van [Southall et al 2007] onderscheiden we gedragseffecten en fysiologische effecten (TTS: tijdelijke verhoging van de gehoordrempel en PTS: permanente verhoging van de gehoordrempel) ten gevolge van onderwatergeluid. Voor beide typen effecten worden in [Southall et al 2007] drempelwaarden voorgesteld. Uit onderzoek in Nederland en Duitsland zijn echter ook recentere gegevens beschikbaar, die meer specifiek toepasbaar zijn voor de bruinvissen en zeehonden in de Noordzee. De te hanteren drempelwaarden zijn in februari-maart 2013 op basis van consensus gekozen in een door Rijkswaterstaat (RWS) georganiseerde werkgroep 'onderwatergeluid'.

### Gedragsbeïnvloeding

Dieren kunnen op allerlei manieren reageren op onderwatergeluid en die reactie zal niet alleen afhangen van de karakteristieken van het geluid, maar ook van de omstandigheden (de 'context') waarin het waargenomen wordt. Niet alle reacties zijn ecologisch relevant. Het is dan ook vrijwel ondoenlijk om absolute criteria vast te stellen die aangeven of de blootstelling aan onderwatergeluid tot ecologische risico's leidt. In [Southall et al 2007] wordt een schaal voorgesteld voor de ernst van de verstoring, waarmee verschillende waarnemingen van gedragsbeïnvloeding met elkaar vergeleken kunnen worden.

In een aantal gevallen lijkt er volgens [Southall et al 2007] een relatie te zijn tussen de waarde op deze schaal en het ontvangen geluiddruk niveau (Sound Pressure Level, SPL). Voor impuls geluid hangen SPL ('het niveau van de over de pulsduur gemiddelde kwadratische geluiddruk') en SEL ('het niveau van de over de pulsduur geïntegreerde kwadratische geluiddruk') samen volgens:  $SPL = SEL - 10 \log(t_{90}/1s)$ , waarbij  $t_{90}$  de pulsduur in seconden is. Het AQUARIUS model geeft geen inzicht in het verloop van de pulsduur als functie van de afstand tot de bron. Het berekent de verspreiding van het heigeluid in termen van de SEL. SEL lijkt ook de beste maat voor de hoorbaarheid van impuls geluid waarbij de pulsduur korter is dan de integratietijd van het gehoor [Kastelein et al 2012c]. Daarom wordt hier voorgesteld om voor gedragsbeïnvloeding een drempelwaarde in termen van de waargenomen  $SEL_{SS}$  te hanteren, eventueel gewogen voor de frequentiegevoeligheid van de diersoort ('weighted single-strike sound exposure level'  $SEL_{SS,W}$  [AETUS 2011]).

In de RWS werkgroep is gekozen voor drempelwaarden voor vermijdingsgedrag, dus niveau 6 en hoger op de schaal uit [Southall et al 2007], zie Appendix A (p.17).

### Bruinvis (*Phocoena phocoena*)

Tijdens de RWS werkgroep vergadering gaf Ron Kastelein (Seamarco, 2013) aan dat bij een recente en nog ongepubliceerde studie vermijdingsgedrag van een bruinvis is waargenomen bij blootstelling aan in het Seamarco bassin afgespeeld heigeluid bij  $SPL_{SS} \approx 142-148$  dB re  $1 \mu Pa^2$ . Bij een typische pulsduur van 100 ms [de Jong & Ainslie 2012] komt dat overeen met  $SEL_{SS} \approx 132-138$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$ . Op basis van deze informatie is gekozen voor een (ongewogen) drempelwaarde  $SEL_{SS} = 136$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$  voor vermijdingsgedrag bij de bruinvis.

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

6/24

Deze in laboratoriumomstandigheden gemeten drempelwaarde stemt in orde van grootte overeen met een suggestie uit veldwaarnemingen, beschreven in [Diederichs et al 2010]: “... bis zu einer maximalen Entfernung von 16,4 km ... Das ist die weiteste Distanz, bis zu der ein Effekt festzustellen war, ... Der Schallpegel während der Rammarbeiten liegt ... bei ca. 135-140 dB, kann aber kaum genauer angegeben werden, da aus dieser Entfernung keine Messwerte vorliegen.“

Gewone zeehond (*Phoca Vitulina*)

In het ‘Shortlist Wind’ rapport van Seamarco [Kastelein et al 2011] wordt de volgende beschrijving gegeven van een observatie van het gedrag van zeehonden bij blootstelling aan in het bassin afgespeeld heigeluid:

“One of the seals swam away from the sound source during the first two sessions, and hauled out at a 2 dB higher level. The other seal did not swim away from the transducer when the pile driving sounds were played back, which demonstrates individual variation between animals in behavioral reactions to sounds.”

De heigeluidpulsen werden in deze studie afgespeeld bij een niveau  $SEL_{SS} = 140$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$ . Dat betekent dat één van de twee zeehonden duidelijk vermijdingsgedrag toonde bij  $SEL_{SS} = 142$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$ . In de RWS werkgroep werd besloten om uit te gaan van een drempelwaarde  $SEL_{SS,W} = 145$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$ , omdat maar één van de twee zeehonden reageerde. Hier is gekozen voor een frequentie gewogen waarde, omdat bij de drempelwaarden voor fysiologische effecten bij de zeehond wordt uitgegaan van gewogen geluidniveaus. Het toepassen van [Southall et al 2007]  $M_{pw}$ -weging (‘M-weighting for pinnipeds in water’) heeft overigens geen grote invloed voor heigeluid.

Fysiologische effecten (TTS/PTS)

Er zijn inmiddels diverse publicaties [Lucke et al 2009, Kastelein et al 2012] waarin wordt aangetoond dat blootstelling aan onderwatergeluid kan leiden tot een tijdelijke gehoordrempelverhoging (Temporary Threshold Shift, TTS) of permanente gehoordrempelverhoging (Permanent Threshold Shift, PTS) bij bruinvissen en zeehonden.

Op basis van de uitgangspunten zoals die in [Southall et al 2007] gehanteerd worden gaan we uit van de volgende definities:

- **‘TTS-onset’**: bij blootgestelde dieren wordt op 1 tot 4 minuten na de blootstelling bij enige frequentie een verhoging van de gehoordrempel met 6 dB gemeten.
- **‘TTS(1 uur)’**: bij blootgestelde dieren wordt op 1 tot 4 minuten na de blootstelling bij enige frequentie een verhoging van de gehoordrempel met 18 dB gemeten.
- **‘PTS-onset’**: bij blootgestelde dieren wordt op 1 tot 4 minuten na de blootstelling bij enige frequentie een verhoging van de gehoordrempel met 40 dB gemeten.

Volgens [Southall et al 2007, p. 423] kan een gehoordrempelverhoging die na een langere periode (in de orde van weken) nog bestaat ‘PTS’ genoemd worden. Om in een vroegtijdig stadium een uitspraak te kunnen doen over het optreden van

PTS wordt, op basis van de kennis over gehoorbeschadiging bij mensen en landzoogdieren, aangenomen [Southal et al 2007, p. 437] dat er een grote kans is op een 'permanente' beschadiging bij een initiële drempelverhoging van 40 dB of meer. Dat verklaart de hier gehanteerde definitie van **PTS-onset**.

Een tijdelijke gehoordrempelverhoging zal, nadat de blootstelling is gestopt, geleidelijk herstellen. Meetgegevens [Kastelein et al 2012-2013, Lucke et al 2009] tonen een initiële trend van het herstel met ongeveer  $-10\log_{10}(t/1 \text{ min})$ , waarbij  $t$  de tijdsduur na de blootstelling is. Dat betekent dat een na 4 minuten gemeten gehoordrempelverhoging van 6 dB (TTS-onset) na ongeveer 16 minuten volledig hersteld zal zijn. Een na 4 minuten gemeten gehoordrempelverhoging van 18 dB zal na ongeveer 1 uur teruggebracht zijn tot 6 dB. We definiëren hier **TTS(1 uur)**, tamelijk arbitrair, als aanvullende indicator van tijdelijke gehoordrempelverhoging.

De relatie tussen de blootstellingsdosis en gehoordrempelverhoging hangt af van diverse parameters van het geluid en van het gehoor:

- Net zoals de hoorbaarheid van signalen is de door blootstelling veroorzaakte drempelverhoging afhankelijk van de signaalvorm, dus o.a. van frequentie-inhoud en duur van het signaal.
- De frequentie waarbij de drempelverhoging optreedt hangt samen met de frequentie van de blootstelling. Bij bruinvis en zeehond treedt ten gevolge van blootstelling aan continugeluid en sonarsignalen de grootste gehoordrempelverhoging op bij de blootstellingsfrequentie [Kastelein et al 2012 & 2013].
- De drempelverhoging bouwt geleidelijk op gedurende de blootstelling en neemt geleidelijk af nadat de blootstelling is gestopt. Dus het moment waarop de gehoordrempel wordt gemeten is van belang voor de beoordeling.
- Periodieke blootstelling aan geluid gaat gepaard met herstel van de drempelverhoging in de periodes tussen de blootstelling door [Kastelein et al 2013]. Het totale effect zal daardoor afhangen van de 'duty cycle' (het percentage van de totale blootstellingsduur waarin het geluid optreedt).

Als akoestische 'dosis' die leidt tot TTS of PTS gebruiken we de over het gehele heipproces van één paal gesommeerde cumulatieve  $SEL_{CUM}$ .

- Het is aannemelijk dat er een grenswaarde voor  $SEL_{SS}$  zal zijn waaronder blootstelling niet bij zal dragen aan de gehoordrempelverhoging ('effective quiet' [Ward et al 1976]), maar bij gebrek aan kwantitatieve informatie over deze grenswaarde voor zeezoogdieren is dit effect hier niet meegenomen.
- Vooralsnog ontbreekt ook de kwantitatieve informatie om rekening te kunnen houden met een eventueel herstel van het gehoor tussen de heiklappen door, dus daar is in de berekeningen geen rekening mee gehouden. Uit de resultaten van recente studies [Kastelein 2013] waarbij een bruinvis is blootgesteld aan sonar sweeps (2-1 kHz in 1 s) bij verschillende 'duty cycles' blijkt dat herstel van het gehoor mogelijk kan leiden tot een verhoging van de  $SEL_{CUM}$  drempelwaarde voor TTS-onset (6 dB na 1-4 minuten) met 4 tot 8 dB. Het is niet duidelijk of een dergelijke verhoging ook zal gelden voor blootstelling aan periodieke heigeluiden, maar het verwaarlozen van dit effect kan mogelijk leiden tot een overschatting van de effectafstanden.

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

7/24



**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

8/24

In [Southall et al 2007, p.442] wordt uit een geschatte toename van het niveau van TTS ('growth rate 2,3 dB shift / dB exposure for pulse sounds') bij toenemende blootstelling ( $SEL_{CUM}$ ) afgeleid dat PTS op zou kunnen treden boven een  $SEL_{CUM}$  drempelwaarde die 15 dB boven de drempelwaarde voor TTS-onset ligt. Dat is indirect, maar bij gebrek aan echte gegevens over PTS is dit een bruikbaar principe. Bij dezelfde groei ligt de drempelwaarde voor TTS(1 uur) 5 dB boven de drempel voor TTS-onset.

Vluchtscenario

Bij het bepalen van de  $SEL_{CUM}$  houden we rekening met de gevolgen van het mogelijke vermijdingsgedrag van de dieren. Daarbij hanteren we een in de RWS werkgroep vastgesteld scenario, dat een realistische 'worst case' simuleert. Omdat de ontvangen geluidniveaus nabij het wateroppervlak overal lager zijn dan de geluidniveaus op grotere diepte gaan we er van uit dat alle dieren zich bij aanvang van het heien op een vaste positie op 1 m van de bodem bevinden. Aangenomen wordt dat de dieren na het waarnemen van de tweede klap voldoende informatie hebben verzameld om op het geluid te reageren. Vanaf klap 3 bevinden alle dieren zich in de berekeningen op dezelfde locatie als bij de eerste twee klappen, maar dan op 1 m van het wateroppervlak. Vanaf die derde klap vluchten de blootgestelde dieren van de paal weg, met een constante snelheid en op een constante diepte, zo lang de ontvangen  $SEL_{SS}$  boven de drempelwaarde voor vermijdingsgedrag valt. Vanaf het moment dat de ontvangen  $SEL_{SS}$  beneden de drempelwaarde voor vermijdingsgedrag valt blijven de dieren stationair. De  $SEL_{CUM}$  hangt daarmee af van de positie waar het dier zich bevindt bij de aanvang van het heien.

De zwemsnelheden waarmee de dieren vluchten zijn binnen de RWS werkgroep besproken en vastgesteld. Ze zijn gebaseerd op een gezamenlijke interpretatie van gegevens uit diverse publicaties uit de wetenschappelijke en 'grijze' literatuur.

Bruinvis (*Phocoena phocoena*)

Bij blootstelling van een bruinvis aan impulsgeluid van 'airgun' [Lucke et al 2009] bleek dat TTS werd waargenomen bij aanzienlijk lagere blootstellingsniveaus dan de in [Southall et al 2007] voorgestelde drempelwaarde voor TTS bij de groep van tandwalvissen ('high frequency cetaceans') waarbij de bruinvis is ingedeeld. Uit voorzorg stellen we voor de niveaus waarbij TTS werd waargenomen in [Lucke et al 2009] te gebruiken als drempelwaarde voor de beoordeling van de berekende blootstelling van bruinvissen aan heigeluid. Lucke's blootstellingsniveaus zijn uitgedrukt in de ongewogen  $SEL_{SS}$  van een enkele puls. Ook uit voorzorg stellen we voor om de drempelwaarden voor TTS te hanteren voor de cumulatieve ongewogen  $SEL_{cum}$ , gesommeerd over alle pulsen waaraan een dier wordt blootgesteld gedurende het heien van één fundatiepaal.

Op basis van de bovenstaande overwegingen hanteren we voor de bruinvis als drempelwaarde voor TTS-onset:  $SEL_{CUM} = 164 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ .



**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
9/24

Voor PTS-onset hanteren we, in navolging van [Southall et al 2007], een drempelwaarde die 15 dB boven de drempelwaarde voor TTS ligt. Dus voor de bruinvis hanteren we als drempelwaarde voor PTS:  $SEL_{CUM} = 179$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$ .

In de berekeningen veronderstellen we dat bruinvissen vluchten met een zwemsnelheid van 3,4 m/s (12,2 km/u).

#### Gewone zeehond (*Phoca Vitulina*)

Voor TTS-onset bij de gewone zeehond gebruiken we de voorzichtige grens die in [Southall et al 2007] indirect is afgeleid uit de data van [Kastak et al 2005]. Die vonden bij een gewone zeehond 6 dB TTS-onset na blootstelling aan continu geluid bij een  $SEL_{CUM}$  van 184 dB re  $1 \mu Pa^2 s$  (25 min, SPL 152 dB re  $1 \mu Pa^2$ ). Southall et al schatten hieruit een drempelwaarde voor TTS ten gevolge van impuls geluid door er het verschil van 13 dB tussen de bij tuimelaars gemeten drempelwaarden voor TTS door continu geluid en TTS door impuls geluid van af te trekken. Die schatting is, zoals ook aangegeven in [Southall et al 2007], waarschijnlijk voorzichtig. Deze drempelwaarde wordt toegepast voor de cumulatieve ongewogen  $SEL_{CUM,W}$ , gesommeerd over alle pulsen waaraan een dier wordt blootgesteld tijdens het heien van één fundatiepaal.

We gebruiken voor de zeehond  $M_{pw}$ -gewogen  $SEL_W$  waarden [Southall et al 2007], waarbij 'pw' staat voor 'pinnipeds in water'. Deze weging houdt rekening met een bandbreedte van het gehoor onderwater tussen 75 Hz tot 75 kHz.

Southall et al geven de volgende drempelwaarde voor PTS-onset bij vinpotigen na blootstelling aan 'multiple pulses':  $SEL_{CUM,W} = 186$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$ .

Voor TTS-onset hanteren we, zoals aangegeven in [Southall et al 2007], een drempelwaarde die 15 dB onder de drempelwaarde voor PTS-onset ligt. Dus voor de zeehond hanteren we  $SEL_{CUM,W} = 171$  dB re  $1 \mu Pa^2 s$  als drempelwaarde voor TTS-onset.

In de berekeningen veronderstellen we dat zeehonden vluchten met een zwemsnelheid van 4,9 m/s (17,6 km/u).

#### Samenvatting drempelwaarden

Samenvattend wordt de geluidblootstelling dus beoordeeld op basis van de maten en drempelwaarden uit Tabel 2:

	<b>bruinvis</b>	<b>zeehond</b>
Vermijding	$SEL_{SS} > 136$ dB re $1 \mu Pa^2 s$	$SEL_{SS,W} > 145$ dB re $1 \mu Pa^2 s$
TTS-onset	$SEL_{CUM} > 164$ dB re $1 \mu Pa^2 s$	$SEL_{CUM,W} > 171$ dB re $1 \mu Pa^2 s$
TTS(1 uur)	$SEL_{CUM} > 169$ dB re $1 \mu Pa^2 s$	$SEL_{CUM,W} > 176$ dB re $1 \mu Pa^2 s$
PTS-onset	$SEL_{CUM} > 179$ dB re $1 \mu Pa^2 s$	$SEL_{CUM,W} > 186$ dB re $1 \mu Pa^2 s$
Vluchtsnelheid	3,4 m/s (12,2 km/u).	4,9 m/s (17,6 km/u)

**Tabel 2: in deze studie gehanteerde drempelwaarden en zwemsnelheden**

## 8 Berekeningen en resultaten

Uiteindelijk zijn 8 scenario's doorgerekend voor het bepalen van de effectafstanden van het onderwatergeluid bij het heien voor de windturbinefundaties voor de Gemini parken:

- Voor 2 diersoorten (bruinvis en zeehond)
- Voor 2 locaties (ZeeEnergie en Buitengaats)
- Voor 2 windsnelheden (0 m/s en 7,5 m/s)

In alle berekeningen is rekening gehouden met een realistisch heiscenario (Figuur 1) en met vermijdingsgedrag van de dieren, zoals beschreven in §7 onder 'vluchtgedrag'.

Tabel 3 geeft de berekende effectafstanden voor de berekeningen voor een omgeving met een uniforme waterdiepte, die gelijk is gekozen aan de waterdiepte bij de heipaal, zie Tabel 1.

In §9 worden voorbeelden gegeven van 'geluidkaarten' waarbij de berekende geluidverspreiding ( $SEL_{SS}$  bij de maximale klapenergie) wordt getoond, rekening houdend met de bathymetrie rond het park. Op basis van dergelijke kaarten is het totale oppervlakte berekend binnen de contourlijn waarbinnen verwacht wordt dat dieren van de geluidbron weg zullen vluchten. De geluidkaarten voor de overige scenario's zijn verzameld in Appendix B.

In §10 worden voorbeelden getoond van de grafieken waaruit de invloedsafstanden (Tabel 3) voor vermijding en fysiologische effecten kunnen worden afgelezen. De grafieken voor de overige scenario's zijn verzameld in Appendix B.

SCENARIO	1	2	3	4	5	6	7	8
dier	zeehond	zeehond	zeehond	zeehond	bruinvis	bruinvis	bruinvis	bruinvis
Locatie (1=ZeeEnergie; 2=Buitengaats)	1	1	2	2	1	1	2	2
windsnelheid (m/s)	0	7,5	0	7,5	0	7,5	0	7,5
<b>RESULTATEN:</b>								
vermijdingsafstand 1 m boven zeebodem (km)	33	24	30	21	67	45	59	38
vermijdingsafstand 1 m onder zeeoppervlak (km)	9	5	9	5	20	12	19	11
afstand voor TTS-onset (km)	22	14	22	14	39	25	39	22
afstand voor TTS(1 uur) (km)	16	10	16	9	28	18	28	16
afstand voor PTS-onset (km)	0.2	0.1	0.2	0.2	0.8	0.5	0.8	0.5

**Tabel 3: Berekende effectafstanden voor de 8 in de tekst beschreven scenario's**

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

10/24

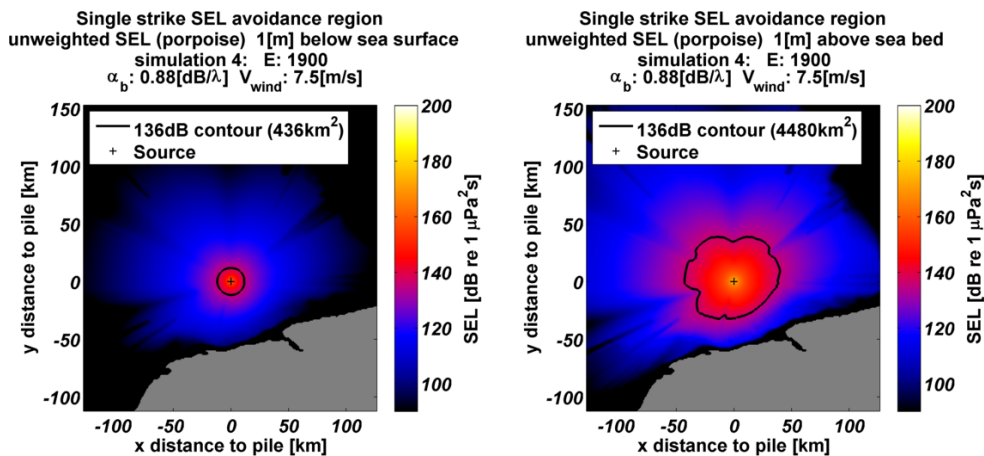
**9 Onderwatergeluidkaarten (vermijdingsgedrag bij bruinvis en zeehond)**

Als eerste zijn geluidkaarten berekend voor de SEL<sub>SS</sub> (bruinvis) en SEL<sub>SS,W</sub> (zeehond) voor scenario's 2 en 6 (Tabel 3), voor de locatie ZeeEnergie, bij 1900 kJ heiklapenergie en een windsnelheid van 7,5 m/s, voor twee verschillende zwemdieptes (1 m onder de waterspiegel en 1 m boven de zeebodem), zie Figuur 3 en Figuur 4. In de berekende geluidkaarten zijn contourlijnen getekend bij de drempelwaarde voor vermijdingsgedrag (Tabel 2). De straal van de bij benadering cirkelvormige contouren voor dieren die op 1 m van de bodem zwemmen is ongeveer 45 km voor de bruinvis en 24 km voor de zeehond. Op 1 m onder het wateroppervlak is die straal gereduceerd tot respectievelijk 12 km voor de bruinvis en 5 km voor de zeehond.

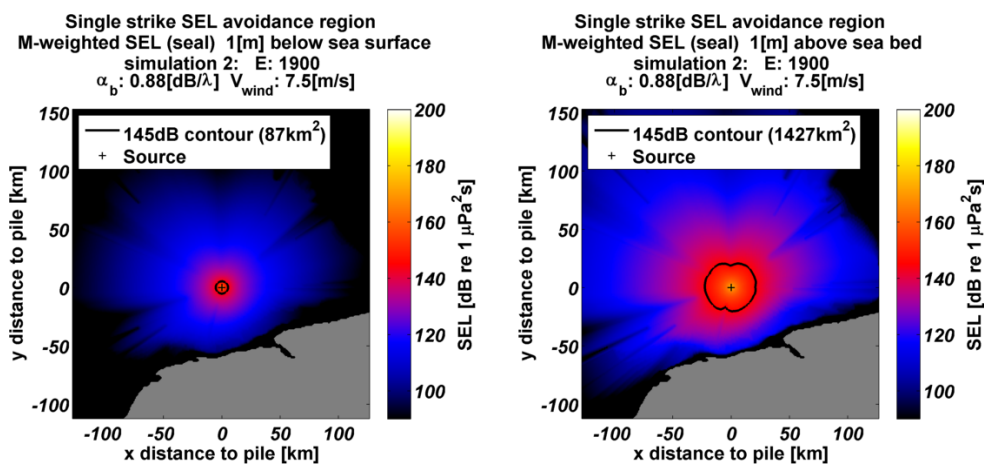
**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
11/24



**Figuur 3:** berekende verdeling van de SEL<sub>SS</sub> op een diepte van 1 m onder de waterspiegel (links) en 1 m boven de zeebodem (rechts). De heillocatie (ZeeEnergie) is aangegeven door het '+' symbool. De zwarte lijnen tonen de contour<sup>2</sup> waarbinnen de drempelwaarde voor gedragsbeïnvloeding (Tabel 2) wordt overschreden voor bruinvissen (scenario 6, Tabel 3).



**Figuur 4:** berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> rond locatie ZeeEnergie voor zeehonden (scenario 2, Tabel 3). (zie verder het bijschrift bij Figuur 3)

<sup>2</sup> Het grijze gebied in deze en de volgende figuren toont de Nederlandse kust.

**Datum**  
14 mei 2013

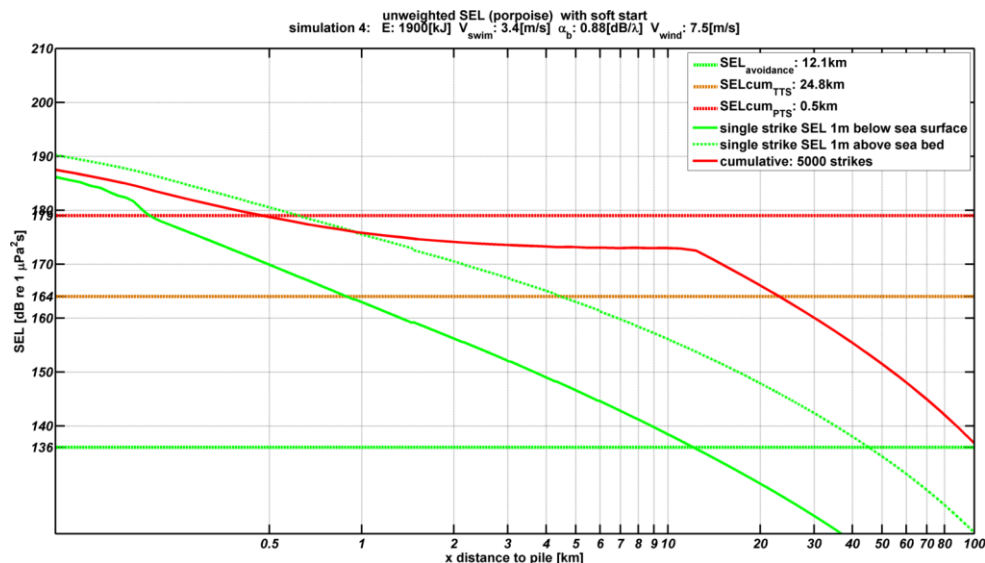
**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
12/24

## 10 Cumulatieve blootstelling (TTS en PTS bij bruinvis en zeehond)

De cumulatieve blootstelling van dieren aan onderwatergeluid bij het heien van een complete paal is berekend voor scenario's bij een uniforme waterdiepte, gelijk aan de waterdiepte bij de heipaal. Bij deze berekeningen is rekening gehouden met het heiscenario en met het mogelijke vermijdingsgedrag van de dieren.

Figuur 5 en Figuur 6 tonen de berekende blootstelling ( $SEL_{SS}$  en  $SEL_{CUM}$ ) als functie van de afstand van het dier tot de heipaal. Dieren die zich bij aanvang van het heien binnen de afstand bevinden waarbij het geluid een vermijdingsreactie veroorzaakt, zwemmen tijdens het heien naar de rand van dit gebied. De uiteindelijke  $SEL_{CUM}$  hangt af van de positie waar het dier zich bevindt bij de aanvang van het heien.

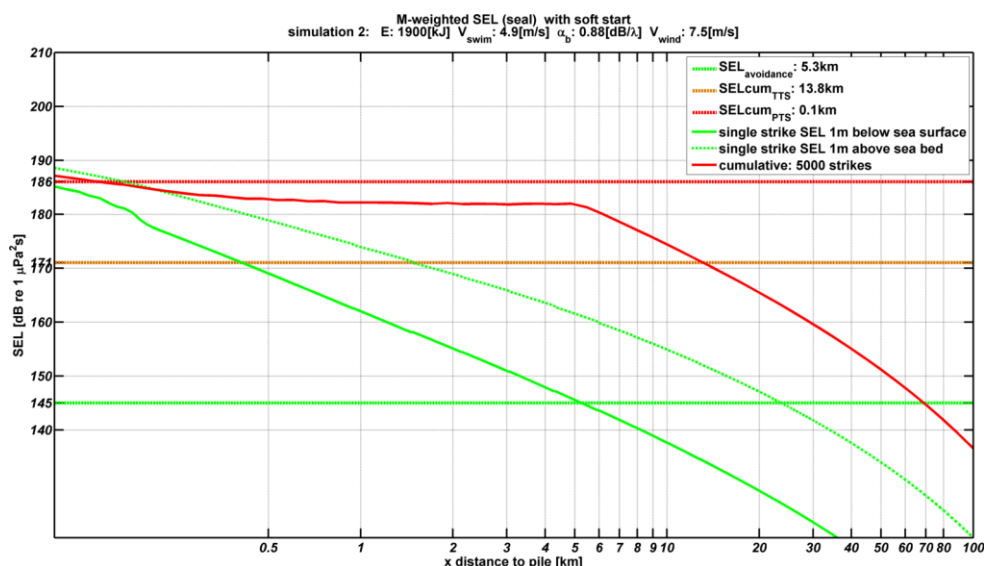


Figuur 5: berekende verdeling van de  $SEL_{SS}$  (locatie ZeeEnergie) op een diepte van 1 m onder de waterspiegel (groene doorgetrokken curve) en op 1 m boven de zeebodem (groene gestippelde curve) en de  $SEL_{CUM}$  waaraan een bruinvis wordt blootgesteld gedurende het complete heiscenario voor één windturbinefundatie (rode doorgetrokken lijn), als functie van de afstand tot de paal waarop een dier zich bij aanvang van het heien op 1 m van de waterbodem bevindt. De horizontale lijnen tonen de niveaus van de drempelwaarden voor vermijdingsgedrag (groen), TTS-onset (oranje) en PTS-onset (rood) voor bruinvissen. De snijpunten van de groene curves ( $SEL_{SS}$ ) met de groene horizontale lijn geven de vermijdingsafstand voor bruinvissen op 1 m onder de waterspiegel (~12 km) en op 1 m boven de bodem (~45 km). De snijpunten van de rode lijn met de rode en oranje stippellijnen geven de 'PTS-afstand' (~0.5 km) en 'TTS-afstand' (~25 km), zie Tabel 3 (scenario 6).

Datum  
14 mei 2013

Onze referentie  
TNO-060-DHW-2013-01132

Blad  
13/24



**Figuur 6:** berekende verdeling van de  $SEL_{SS,W}$  (locatie ZeeEnergie) op een diepte van 1 m onder de waterspiegel (gele doorgetrokken curve) en op 1 m boven de zeebodem (groene gestippelde curve) en de  $SEL_{CUM,W}$  waaraan zeehonden worden blootgesteld gedurende het complete heiscenario voor één windturbinefundatie (rode doorgetrokken lijn), als functie van de afstand tot de paal waarop het dier zich bij aanvang van het heien bevindt. De snijpunten van de groene curves ( $SEL_{SS}$ ) met de groene horizontale lijn geven de vermijdingsafstand voor zeehonden op 1 m onder de waterspiegel (~5 km) en op 1 m boven de bodem (~24 km). De snijpunten van de rode lijn met de rode en oranje stippellijnen geven de 'PTS-afstand' (~0.1 km) en 'TTS-afstand' (~14 km), zie Tabel 3 (scenario 2).

## 11 Onzekerheden

De aanpak voor het berekenen van effectafstanden en de te hanteren invoerparameters en grenswaarden zijn gedurende dit project nieuw ontwikkeld en moeten worden gezien als een eerste verkenning van deze benadering binnen een beperkte tijd. Door de beperkte aanwezigheid van modellen en meetgegevens zijn er diverse bronnen van onzekerheid in de berekeningsresultaten:

- Bij de modellering van de heipaal als onderwatergeluidbron kon nog geen gebruik gemaakt worden van de geavanceerdere modellen die bij TNO in ontwikkeling zijn.
- De gehanteerde bronsterkte van het heigeluid gaat uit van een bovengrens van de meetresultaten voor het PAWP(Q7) park. De ondergrens van die meetgegevens ligt ca. 6 dB lager.
- Het toegepaste geluidverspreidingsmodel AQUARIUS is nog niet experimenteel gevalideerd voor propagatie over afstanden groter dan ~6 km.
- De in AQUARIUS toegepaste invoergegevens voor de zeebodem zijn gebaseerd op een realistische schatting van de sedimenteigenschappen ('medium sand' [Ainslie 2010]). Uit een gevoeligheidsanalyse bleek dat een halvering van het absorptieverlies in de bodem (overeenkomend met 'medium silt') tot ongeveer 1,5 maal zo grote effectafstanden zou kunnen leiden.
- De onzekerheid in de gehanteerde drempelwaarden voor verstoring, vermijding en TTS/PTS zijn uitgebreid besproken in §8.

## 12 Conclusie

Dit memo geeft de resultaten van een berekening van de mogelijke afstanden waarop het heigeluid voor de Gemini parken effect kan hebben op bruinvissen en zeehonden. Uit de berekeningen blijkt dat, vanwege cumulatie van het geluid gedurende de duur van het heien van een paal, de afstanden waarop fysiologische effecten (TTS en PTS) op kunnen treden groter kunnen zijn dan de afstanden waarop vermijdingsgedrag kan optreden bij dieren die zich vlak onder het wateroppervlak bevinden.

Bij het beoordelen van de berekende effectafstanden dient rekening gehouden te worden met de vele onzekerheden in berekeningen en grenswaarden. De berekeningsresultaten geven een indicatie van de orde van grootte van de afstanden tot de heipaal waarop het onderwatergeluid kan leiden tot vermijdingsgedrag of fysiologische effecten.

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

14/24

### 13 Referenties

AETUS 2011, Ad hoc European working group on Terminology for Underwater Sound (AETUS), report TNO-DV 2011 C235 'Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part I: physical quantities and their units'. Available from [http://www.noordzeeloket.nl/ihm/themas/Shortlist\\_Ecologische\\_Monitoring\\_Wind\\_op\\_Zee/Geluidsonderzoek/](http://www.noordzeeloket.nl/ihm/themas/Shortlist_Ecologische_Monitoring_Wind_op_Zee/Geluidsonderzoek/)

Ainslie 2010, Principles of Sonar Performance Modeling. Springer-Praxis

Ainslie et al 2012, 'What is the source level of pile-driving noise in water?' In The Effects of Noise on Aquatic Life, edited by Popper & Hawkins (Springer), pp 445-448.

de Jong & Ainslie 2012, report TNO 2012 R10081 'Analysis of the underwater sound during piling activities for the Off-shore Wind Park Q7' (update of TNO report MON-RPT-033-DTS-2007-03388)

Diedrichs et al 2010, report Biola & BioConsult 'Auswirkungen des Baus des Offshore-Testfelds „Alpha Ventus“ auf marine Säugetiere'

Kastak et al 2005, 'Underwater temporary threshold shift in pinnipeds: Effects of noise level and duration', Journal of the Acoustical Society of America 118(5), 3154–3163

Kastelein et al 2011, Seamarco report 2011/01 'Temporary hearing threshold shifts and recovery in a harbor porpoise and two harbor seals after exposure to continuous noise and playbacks of pile driving sounds'

Kastelein et al 2102a, 'Hearing threshold shifts and recovery in harbor seals (*Phoca vitulina*) after octave-band noise exposure at 4 kHz', Journal of the Acoustical Society of America 132(4), pp 2745–2761

Kastelein et al 2102b, 'Temporary threshold shifts and recovery in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after octave-band noise at 4kHz', Journal of the Acoustical Society of America 132(5), pp 3525-3537

Kastelein et al 2102c, 'The hearing threshold of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for impulsive sounds', Journal of the Acoustical Society of America 132(2), pp 607-610

Kastelein et al 2013a 'Hearing frequency thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) temporarily affected by a continuous 1.5 kHz tone'. SEAMARCO 2013, draft paper

Kastelein et al 2013b 'Comparative temporary threshold shifts in a harbor porpoise and two harbor seals, and severe temporary threshold shift in a harbor seal'. SEAMARCO report 2013-02 (draft version 1, 18 February 2013)

Kastelein et al 2013c 'Recovery of hearing in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) between successive sound signals (correction factor for SELcum of pile driving)'. SEAMARCO report 2013-03 (draft version 1, 4 March 2013)

Kastelein 2013d (private communication) Data files 'HP, TTS LFAS (1-2 KHZ) PRELIMINARY RESULTS V19 FOR TNO.XLSX' and 'HP TTS 1-2 KHZ DC 100% VERSUS VARIABLE DC, V1.XLSX'

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

15/24



Lucke et al 2009, 'Temporary shift in masked hearing threshold in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli', Journal of the Acoustical Society of America 125(6), pp 4060-4070.

Southall et al 2007, 'Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations', Aquatic Mammals 33 (4), pp 411-521

Ward et al 1976, 'Effective quiet and moderate TTS: Implications for noise exposure standards', Journal of the Acoustical Society of America, 59(1), 160-165

Weston 1971, 'Intensity-range relations in oceanographic acoustics', Journal of Sound and Vibration 18(2), pp 271-287

Weston 1976, 'Propagation in water with uniform sound velocity but variable-depth lossy bottom', Journal of Sound and Vibration 47(4), pp 473-483

Zampolli et al 2013, 'Validation of finite element computations for the quantitative prediction of underwater noise from impact pile driving', accepted for the Journal of the Acoustical Society of America (in press)

**Datum**

14 mei 2013

**Onze referentie**

TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**

16/24

**A. Schaal voor de ernst van gedragsbeïnvloeding [Southall et al 2007]**

**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
17/24

450

*Southall et al.*

**Table 4.** Severity scale for ranking observed behavioral responses of free-ranging marine mammals and laboratory subjects to various types of anthropogenic sound

Response score <sup>1</sup>	Corresponding behaviors (Free-ranging subjects) <sup>2</sup>	Corresponding behaviors (Laboratory subjects) <sup>2</sup>
0	- No observable response	- No observable response
1	- Brief orientation response (investigation/visual orientation)	- No observable response
2	- Moderate or multiple orientation behaviors - Brief or minor cessation/modification of vocal behavior - Brief or minor change in respiration rates	- No observable negative response; may approach sounds as a novel object
3	- Prolonged orientation behavior - Individual alert behavior - Minor changes in locomotion speed, direction, and/or dive profile but no avoidance of sound source - Moderate change in respiration rate - Minor cessation or modification of vocal behavior (duration < duration of source operation), including the Lombard Effect	- Minor changes in response to trained behaviors (e.g., delay in stationing, extended inter-trial intervals)
4	- Moderate changes in locomotion speed, direction, and/or dive profile but no avoidance of sound source - Brief, minor shift in group distribution - Moderate cessation or modification of vocal behavior (duration ≈ duration of source operation)	- Moderate changes in response to trained behaviors (e.g., reluctance to return to station, long inter-trial intervals)
5	- Extensive or prolonged changes in locomotion speed, direction, and/or dive profile but no avoidance of sound source - Moderate shift in group distribution - Change in inter-animal distance and/or group size (aggregation or separation) - Prolonged cessation or modification of vocal behavior (duration > duration of source operation)	- Severe and sustained changes in trained behaviors (e.g., breaking away from station during experimental sessions)
6	- Minor or moderate individual and/or group avoidance of sound source - Brief or minor separation of females and dependent offspring - Aggressive behavior related to noise exposure (e.g., tail/flipper slapping, fluke display, jaw clapping/gnashing teeth, abrupt directed movement, bubble clouds) - Extended cessation or modification of vocal behavior - Visible startle response - Brief cessation of reproductive behavior	- Refusal to initiate trained tasks
7	- Extensive or prolonged aggressive behavior - Moderate separation of females and dependent offspring - Clear anti-predator response - Severe and/or sustained avoidance of sound source - Moderate cessation of reproductive behavior	- Avoidance of experimental situation or retreat to refuge area (≤ duration of experiment) - Threatening or attacking the sound source
8	- Obvious aversion and/or progressive sensitization - Prolonged or significant separation of females and dependent offspring with disruption of acoustic reunion mechanisms - Long-term avoidance of area (> source operation) - Prolonged cessation of reproductive behavior	- Avoidance of or sensitization to experimental situation or retreat to refuge area (> duration of experiment)
9	- Outright panic, flight, stampede, attack of conspecifics, or stranding events - Avoidance behavior related to predator detection	- Total avoidance of sound exposure area and refusal to perform trained behaviors for greater than a day

<sup>1</sup>Ordinal scores of behavioral response severity are not necessarily equivalent for free-ranging vs laboratory conditions.

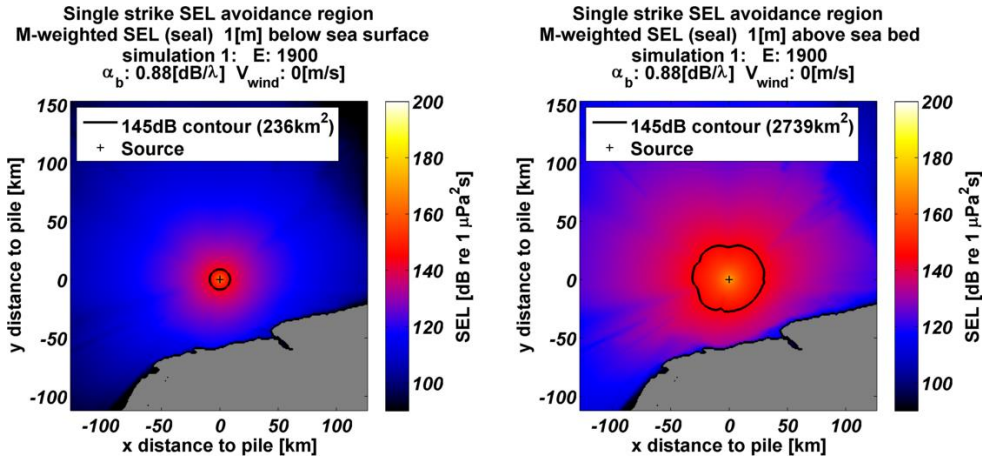
<sup>2</sup>Any single response results in the corresponding score (i.e., all group members and behavioral responses need not be observed). If multiple responses are observed, the one with the highest score is used for analysis.

**B. Geluidverspreidingskaarten (enkele klap)**

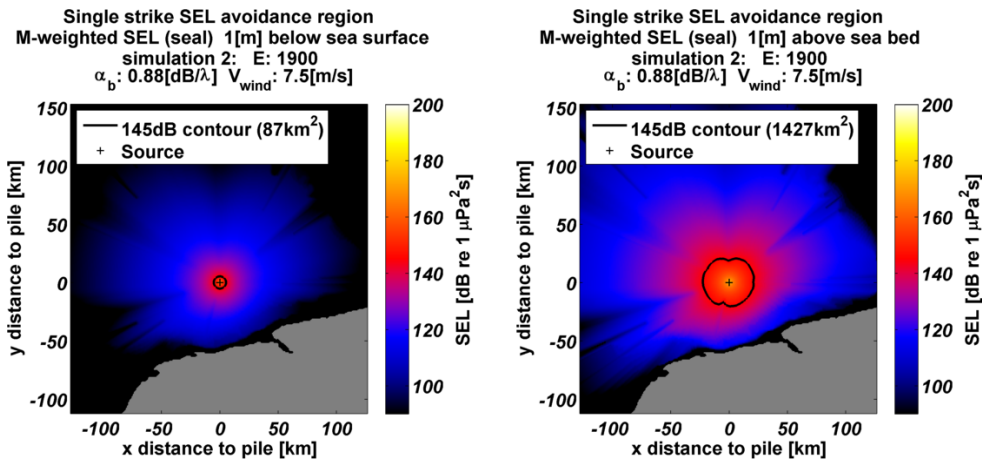
**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
18/24



Scenario 1 (locatie ZeeEnergie, wind 0 m/s, zeehonden): berekende verdeling van de SEL<sub>SS</sub> op een diepte van 1 m onder de waterspiegel (links) en 1 m boven de zeebodem (rechts). De heillocatie is aangegeven door het '+' symbool. De zwarte lijnen tonen de contour waarbinnen de drempelwaarde voor vermijdingsgedrag (Tabel 2) wordt overschreden.



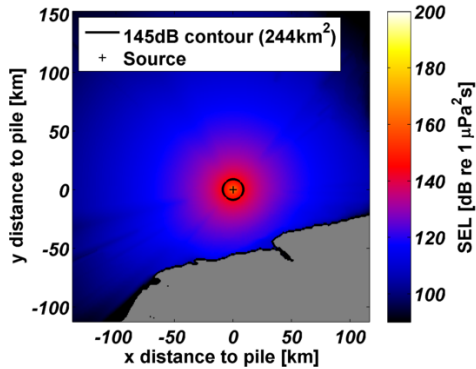
Scenario 2 (locatie ZeeEnergie, wind 7,5 m/s, zeehonden): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,w</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)

Datum  
14 mei 2013

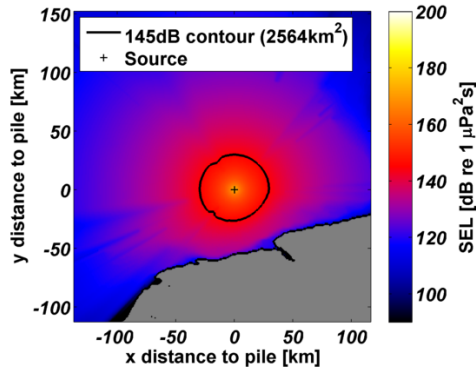
Onze referentie  
TNO-060-DHW-2013-01132

Blad  
19/24

Single strike SEL avoidance region  
M-weighted SEL (seal) 1[m] below sea surface  
simulation 1: E: 1900  
 $\alpha_b$ : 0.88[dB/ $\lambda$ ]  $V_{wind}$ : 0[m/s]

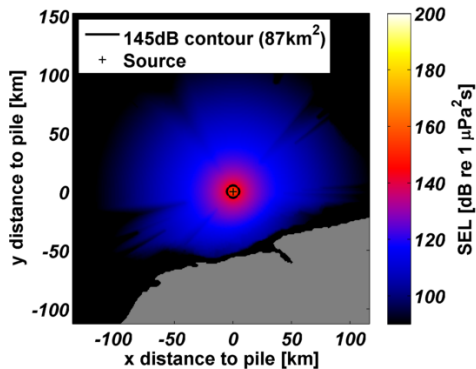


Single strike SEL avoidance region  
M-weighted SEL (seal) 1[m] above sea bed  
simulation 1: E: 1900  
 $\alpha_b$ : 0.88[dB/ $\lambda$ ]  $V_{wind}$ : 0[m/s]

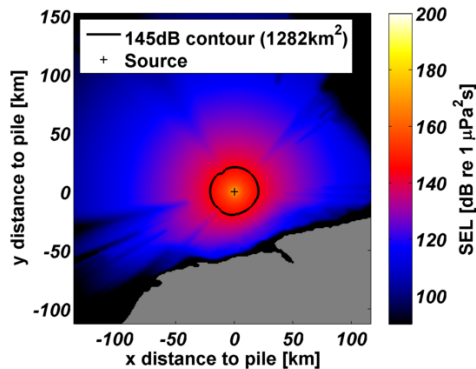


Scenario 3 (locatie Buitengaats, wind 0 m/s, zeehonden): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)

Single strike SEL avoidance region  
M-weighted SEL (seal) 1[m] below sea surface  
simulation 2: E: 1900  
 $\alpha_b$ : 0.88[dB/ $\lambda$ ]  $V_{wind}$ : 7.5[m/s]

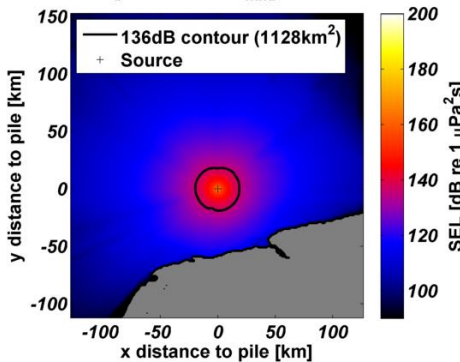


Single strike SEL avoidance region  
M-weighted SEL (seal) 1[m] above sea bed  
simulation 2: E: 1900  
 $\alpha_b$ : 0.88[dB/ $\lambda$ ]  $V_{wind}$ : 7.5[m/s]

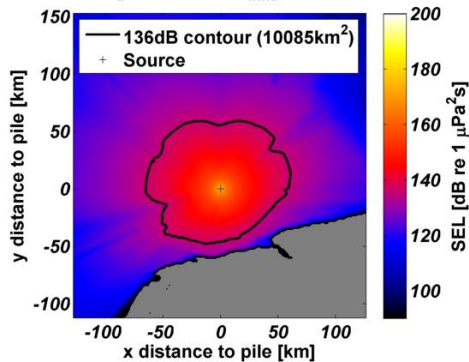


Scenario 4 (locatie Buitengaats, wind 7,5 m/s, zeehonden): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)

Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] below sea surface  
simulation 3: E: 1900  
 $\alpha_b$ : 0.88[dB/ $\lambda$ ]  $V_{wind}$ : 0[m/s]



Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] above sea bed  
simulation 3: E: 1900  
 $\alpha_b$ : 0.88[dB/ $\lambda$ ]  $V_{wind}$ : 0[m/s]



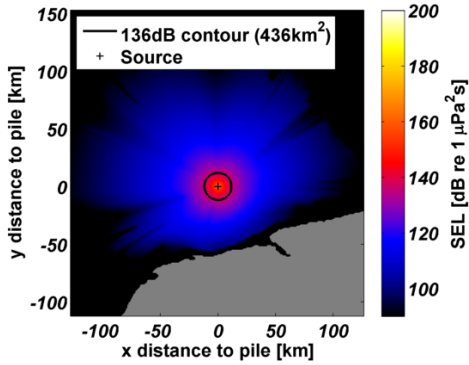
Scenario 5 (locatie ZeeEnergie, wind 0 m/s, bruinvissen): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)

**Datum**  
14 mei 2013

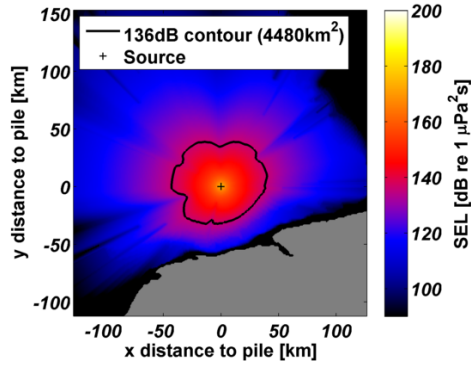
**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
20/24

Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] below sea surface  
simulation 4: E: 1900  
 $\alpha_b: 0.88[\text{dB}/\lambda]$   $V_{\text{wind}}: 7.5[\text{m/s}]$

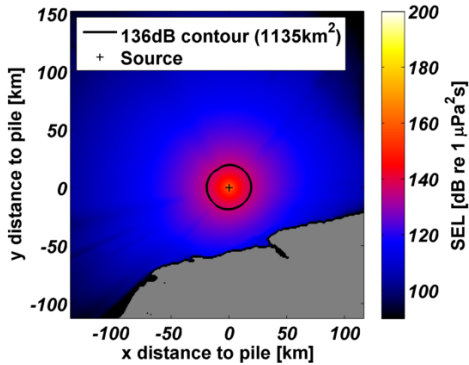


Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] above sea bed  
simulation 4: E: 1900  
 $\alpha_b: 0.88[\text{dB}/\lambda]$   $V_{\text{wind}}: 7.5[\text{m/s}]$

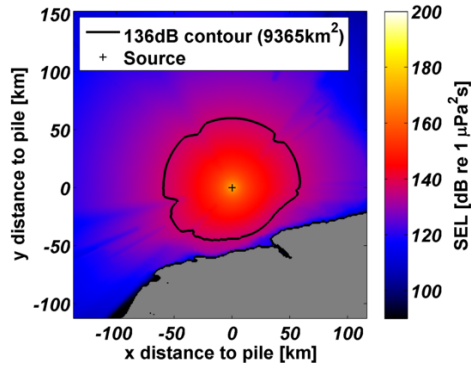


**Scenario 6 (locatie ZeeEnergie, wind 7,5 m/s, bruinvissen): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)**

Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] below sea surface  
simulation 3: E: 1900  
 $\alpha_b: 0.88[\text{dB}/\lambda]$   $V_{\text{wind}}: 0[\text{m/s}]$

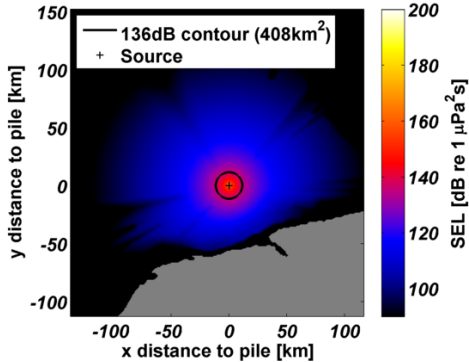


Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] above sea bed  
simulation 3: E: 1900  
 $\alpha_b: 0.88[\text{dB}/\lambda]$   $V_{\text{wind}}: 0[\text{m/s}]$

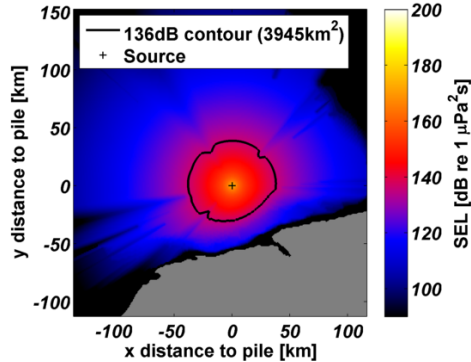


**Scenario 7 (locatie Buitengaats, wind 0 m/s, bruinvissen): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)**

Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] below sea surface  
simulation 4: E: 1900  
 $\alpha_b: 0.88[\text{dB}/\lambda]$   $V_{\text{wind}}: 7.5[\text{m/s}]$



Single strike SEL avoidance region  
unweighted SEL (porpoise) 1[m] above sea bed  
simulation 4: E: 1900  
 $\alpha_b: 0.88[\text{dB}/\lambda]$   $V_{\text{wind}}: 7.5[\text{m/s}]$



**Scenario 8 (locatie Buitengaats, wind 7,5 m/s, bruinvissen): berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> met vermijdingscontour (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)**

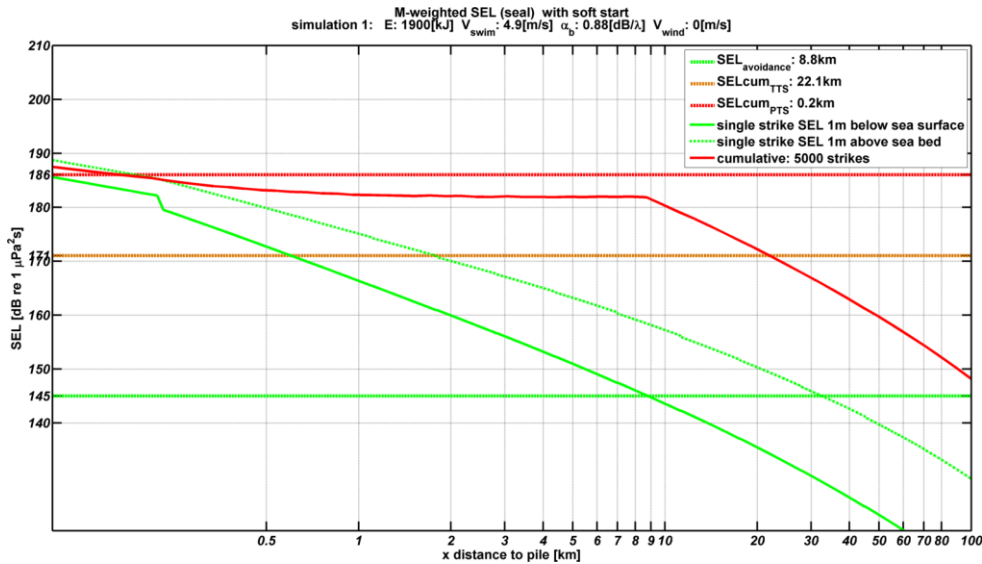


**C. Geluidverspreidingsgrafieken (cumulatief)**

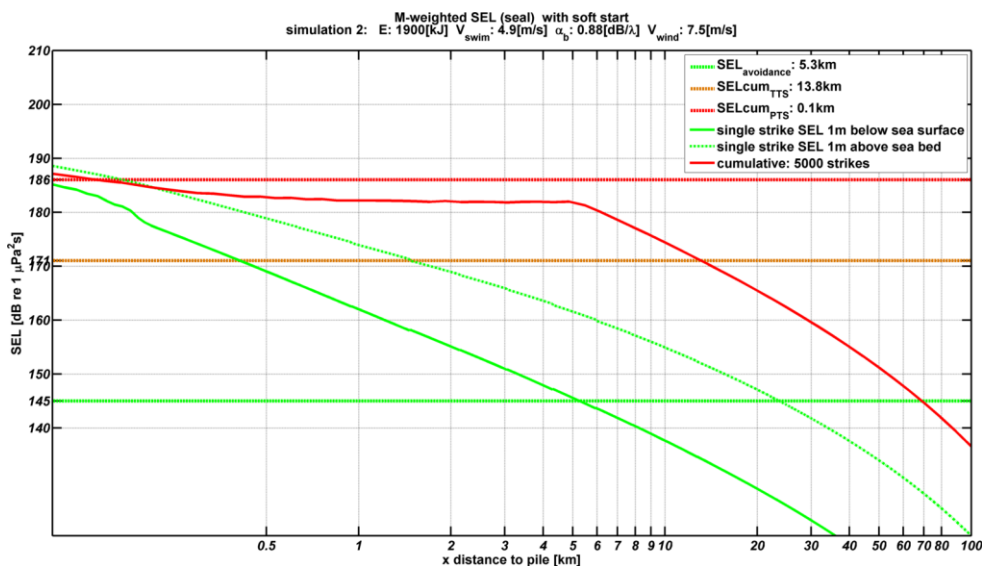
**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
21/24



**Scenario 1 (locatie ZeeEnergie, wind 0 m/s, zeehonden):** berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> op een diepte van 1 m onder de waterspiegel (groene doorgetrokken lijn) en op 1 m boven de zeebodem (groene gestippelde curve) en de SEL<sub>CUM,W</sub> (rode doorgetrokken lijn), als functie van de afstand tot de paal waarop het dier zich bij aanvang van het heien bevindt. Het snijpunt van de groene curven (SEL<sub>SS</sub>) met de groene horizontale lijn geven de vermijdingsafstanden voor zeehonden op twee dieptes. De snijpunten van de rode lijn met de rode en oranje horizontale lijnen geven de 'PTS-afstand' en 'TTS-afstand', zie Tabel 3.

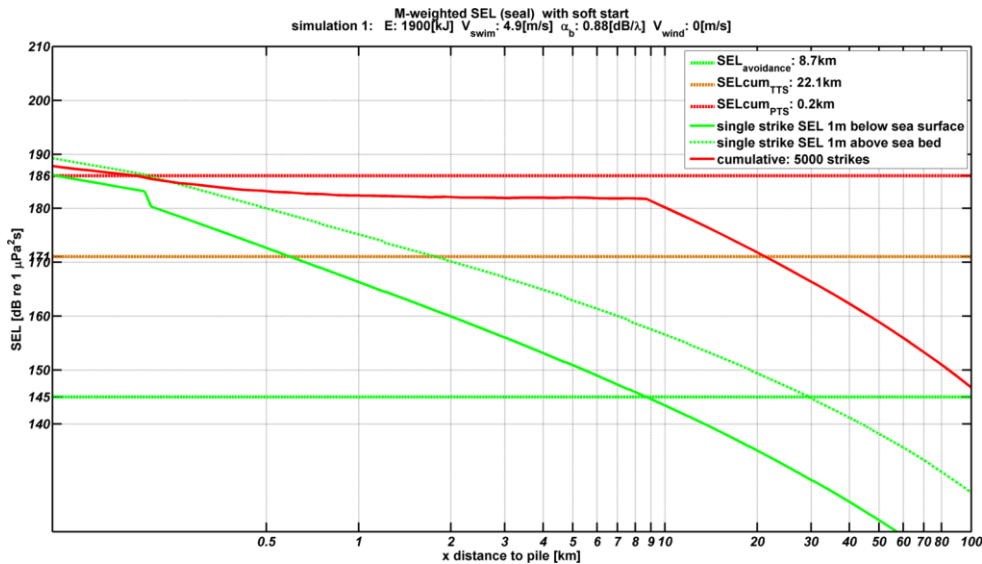


**Scenario 2 (locatie ZeeEnergie, wind 7,5 m/s, zeehonden):** berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM,W</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)

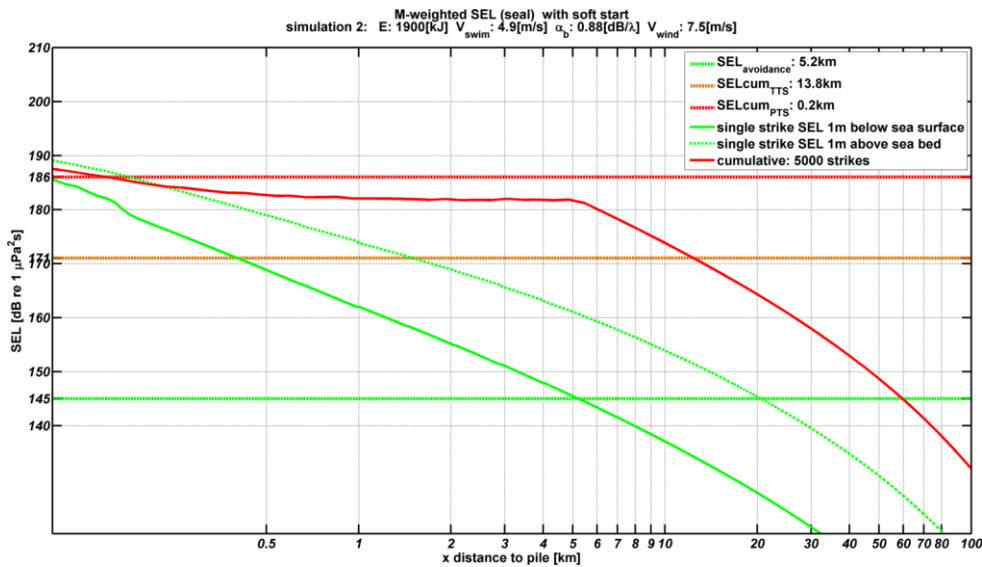
**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
22/24



**Scenario 3 (locatie Buitengaats, wind 0 m/s, zeehonden):** berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM,W</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)



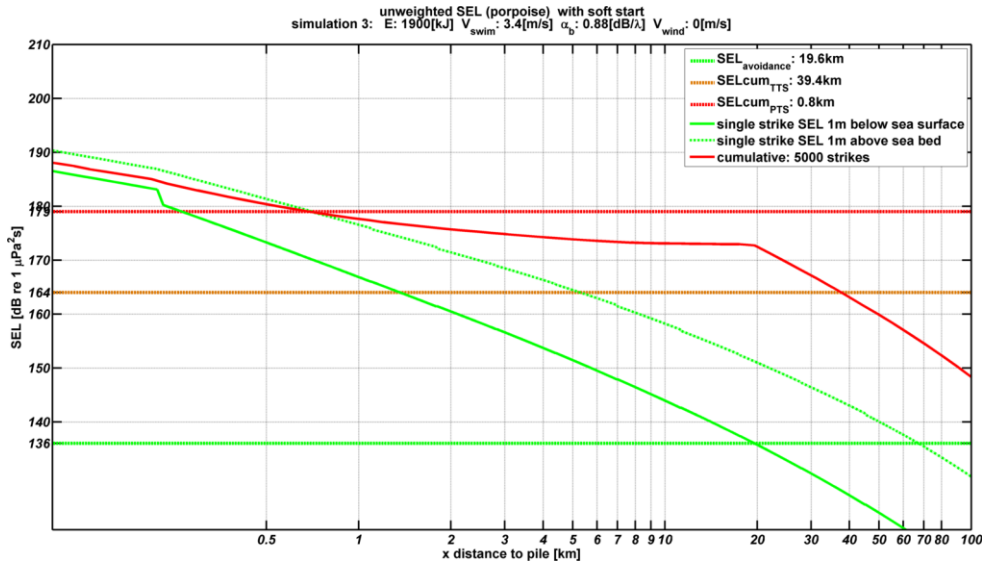
**Scenario 4 (locatie Buitengaats, wind 7,5 m/s, zeehonden):** berekende verdeling van de SEL<sub>SS,W</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM,W</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)



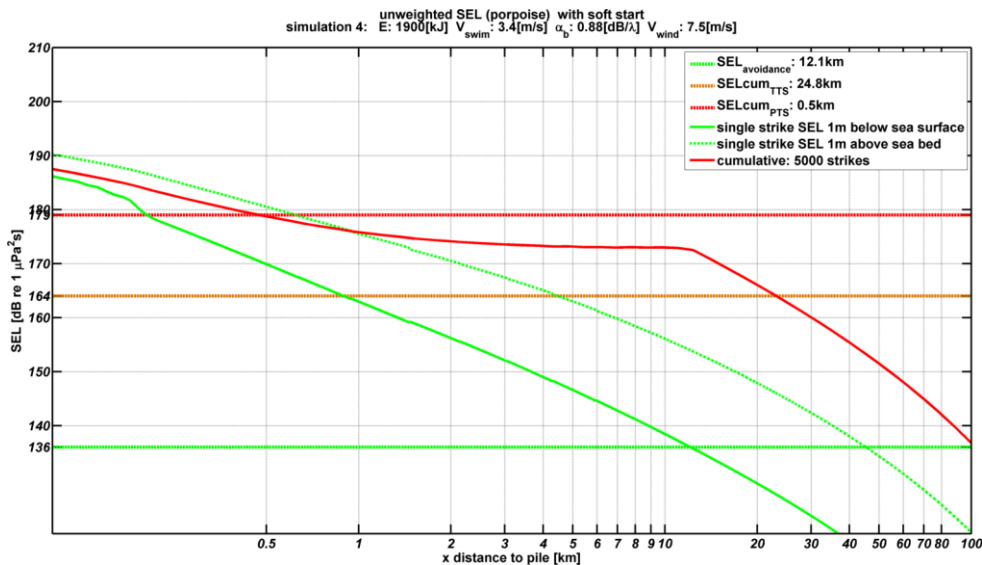
**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
23/24



**Scenario 5 (locatie ZeeEnergie, wind 0 m/s, bruinvissen): berekende verdeling van de SEL<sub>SS</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)**

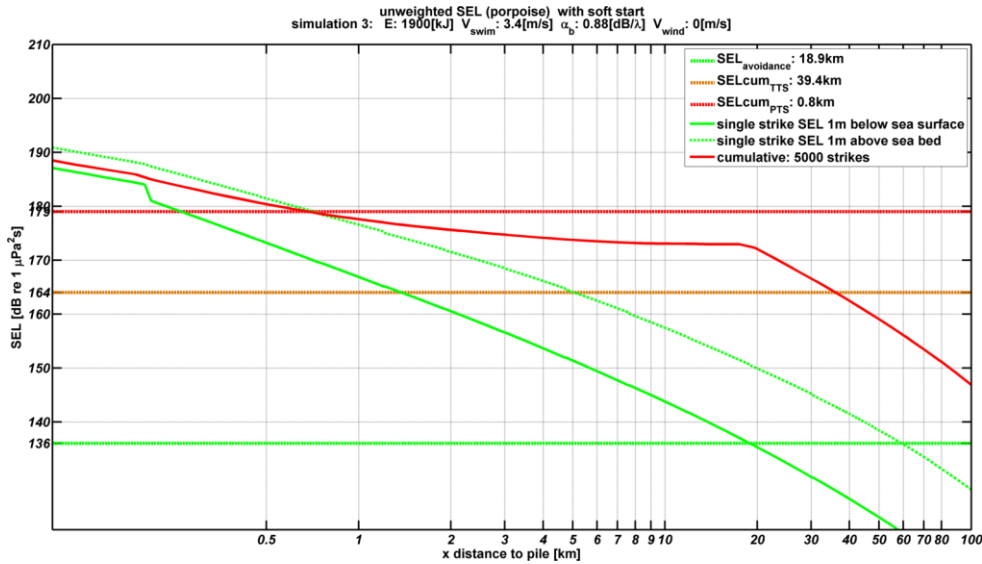


**Scenario 6 (locatie ZeeEnergie, wind 7,5 m/s, bruinvissen): berekende verdeling van de SEL<sub>SS</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)**

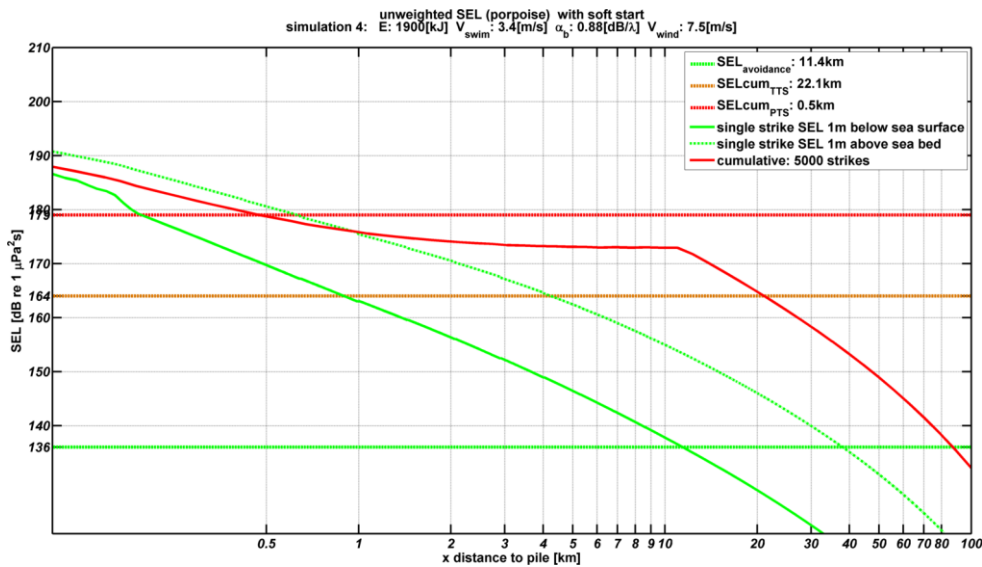
**Datum**  
14 mei 2013

**Onze referentie**  
TNO-060-DHW-2013-01132

**Blad**  
24/24



**Scenario 7 (locatie Buitengaats, wind 0 m/s, bruinvissen):** berekende verdeling van de SEL<sub>SS</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)



**Scenario 8 (locatie Buitengaats, wind 7,5 m/s, bruinvissen):** berekende verdeling van de SEL<sub>SS</sub> op twee dieptes en de SEL<sub>CUM</sub> (zie verder het bijschrift bij Scenario 1)