

› **FREQUENTIEWEGING?
ANALYSE METINGEN ONDERWATERGELUID WINDPARKEN
EN BEPALEN GELUIDSMAAT | TNO - WMR - WATERPROOF**

› **KEC KENNISLEEMTE FREQUENTIEWEGING**

- › “In de berekeningen voor bruinvissen is vooralsnog geen rekening gehouden met de gehoorgevoeligheid als gevolg van de frequentie.
- › Het is aannemelijk dat het toepassen van een met de frequentiegevoeligheid van het gehoor van de bruinvissen gewogen SEL-waarde een betere voorspelling geeft van de gedragsreactie.
- › De ten tijde van het opstellen van het KEC 4.0 beschikbare gegevens lieten het echter niet toe duidelijke conclusies te trekken over de noodzaak daartoe.”

› INHOUD

- › Toelichting frequentieweging en beoordelingsmaten voor onderwatergeluid
- › Resultaten onderzoek Borssele – Gemini
- › Discussie





- › Doelstelling: werkgroep informeren en feedback ontvangen

› GESCHIEDENIS

› Conclusies uit TNO rapport (2018):

- › *frequency weighting can explain TTS/PTS induced by different sounds*
- › *frequency weighting can explain the differences in audibility of different sounds*
- › *frequency weighting cannot yet explain behavioural response, due to lack of data*

› Voorstellen uit TNO rapport (2018):

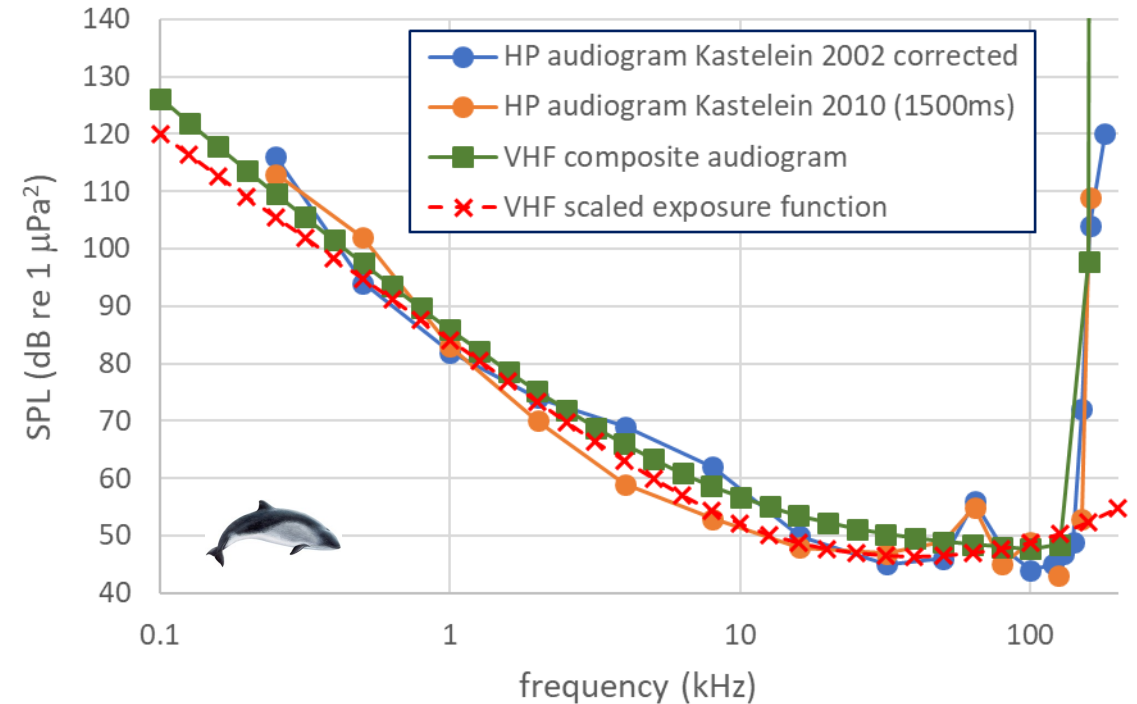
1. *Analysis of data from field studies during the construction of the Luchterduinen and Gemini wind farms* 
2. *Further analysis of data from German field studies* 
3. *Studies of porpoise behavioural response to sound pulses with different frequency content* 
4. *Studies of the effects of masking sound on behavioural response to piling sounds* 

› Voorstel WZO (Oktober 2017):

- *Internationale workshop (Noordzeelanden) over frequentieweging* 

› FREQUENTIEWEGING

- › Rekening houden met de gehoorgevoeligheid als gevolg van de frequentie
- › Welke “gehoor­gevoeligheid”?
 - › Kastelein et al 2010 gemeten audiogram
 - › Southall et al 2019 ‘composite audiogram’
 - › Southall et al 2019 ‘exposure function’ voor TTS/PTS
- › Praktisch handig om ‘exposure function’ te gebruiken (één maat), maar dat is nog geen standaard



Aquatic Mammals 2019, 45(2), 125-232, DOI 10.1578/AM.45.2.2019.125

Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects

Brandon L. Southall,^{1,2} James J. Finneran,³ Colleen Reichmuth,²
Paul E. Nachtigall,⁴ Darlene R. Ketten,^{5,6} Ann E. Bowles,⁷ William T. Ellison,⁸
Douglas P. Nowacek,^{9,10} and Peter L. Tyack^{5,11}

› FREQUENTIEWEGING

- › Hoorbaarheid en ‘noise induced hearing threshold shifts’ hangen af van de frequentie-inhoud van het geluid waaraan dieren zijn blootgesteld
- › Gedragsreacties lijken ook af te hangen van de frequentie-inhoud:
- › Tougaard et al. [2015] propose “an exposure limit for negative phonotaxis to be 45 dB above the hearing threshold”

Marine Pollution Bulletin 90 (2015) 196–208

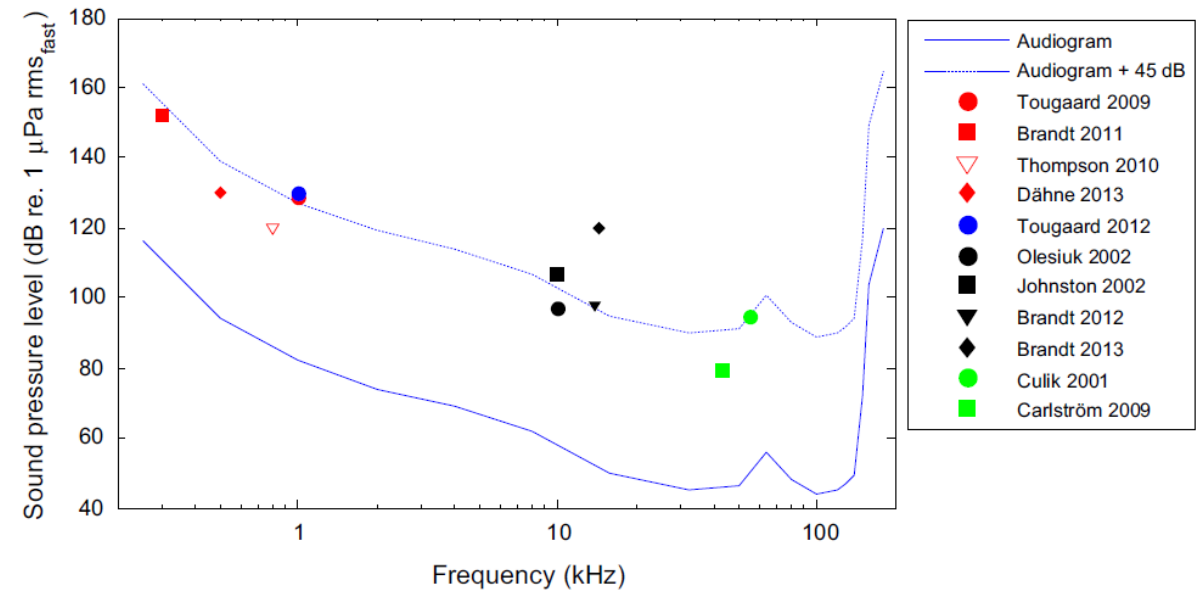
Contents lists available at ScienceDirect

Marine Pollution Bulletin

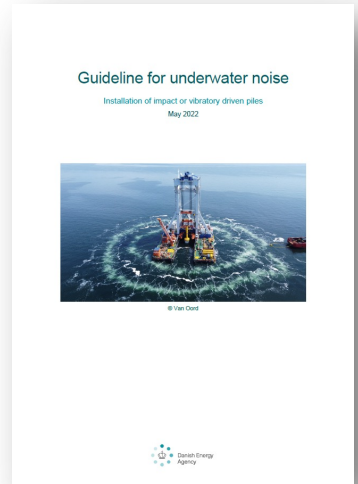
journal homepage: www.elsevier.com/locate/marpolbul

Cetacean noise criteria revisited in the light of proposed exposure limits for harbour porpoises

Jakob Tougaard ^{a,*}, Andrew J. Wright ^{a,b}, Peter T. Madsen ^{c,d}



› DANISH GUIDELINE (2022)



The most important changes in this current revision of the Guideline are:

- a. Inclusion of behavioural disturbance of marine mammals and*
- b. Introduction of frequency weighting principles and acoustic criteria according to auditory groups*

› Southall 2019 weighting

› *For the purpose of evaluating behavioural reactions to the noise, the RMS-sound pressure level calculated over a time interval corresponding to the average integration time of the mammalian ear (125 ms) is appropriate*

$$L_{p,rms,125ms} = L_{E,p} + 10 \log_{10}(0.125) = L_{E,p} + 9 \text{ dB}$$

› *Harbour Porpoise Threshold for Behavioural Disturbance: $L_{p,VHF,125ms} = 103 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$
($L_{E,VHF} \approx 94 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$)*

› *“coarse estimate, to be used only until better data become available”*

› KASTELEIN ET AL 2022

Aquatic Mammals 2022, 48(2), 97-109, DOI 10.1578/AM.48.2.2022.97

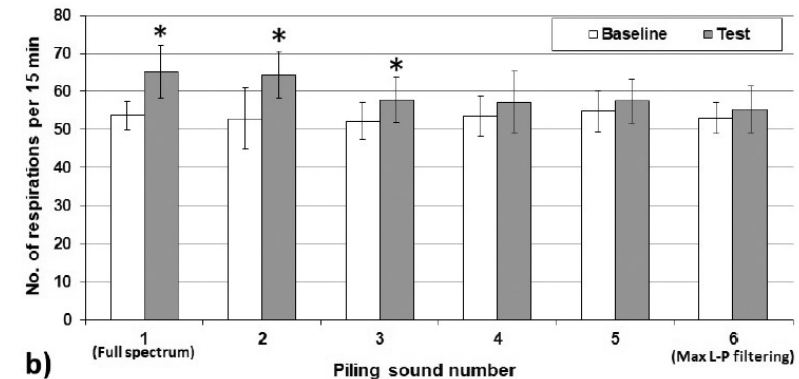
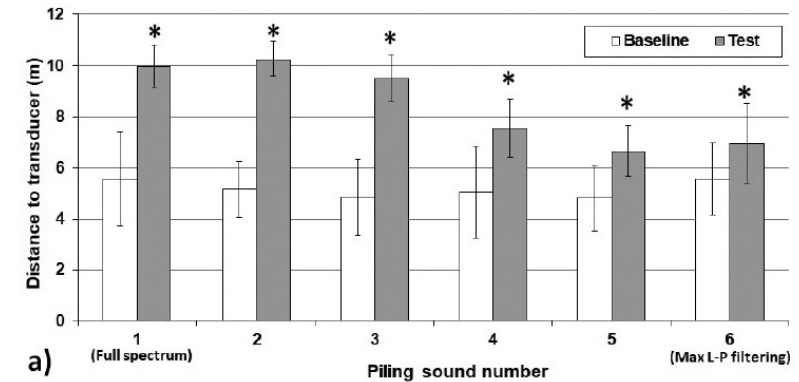
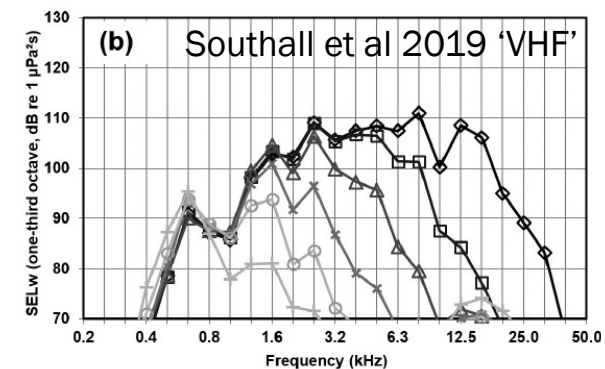
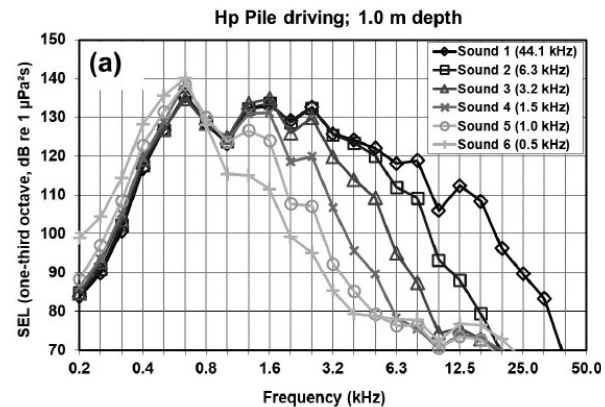
Behavioral Responses of a Harbor Porpoise (*Phocoena phocoena*) Depend on the Frequency Content of Pile-Driving Sounds

Ronald A. Kastelein,¹ Christ A. F. de Jong,² Jakob Tougaard,³ Lean Helder-Hoek,¹ and Linde N. Defiliet¹

› Heigeluiden afgespeeld bij ongewogen SELss = 134 (±3) dB re 1 μPa²s

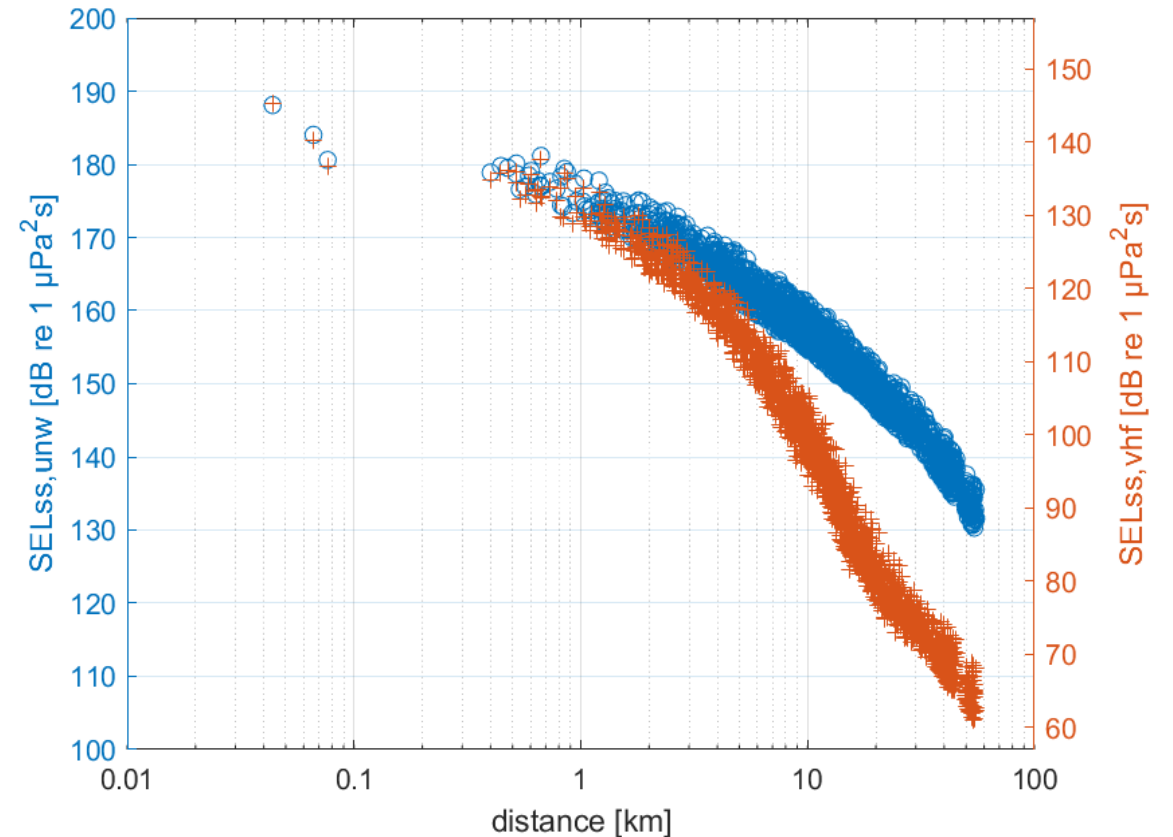
› Effect (afstand & ademhalen) neemt af met afnemende gewogen SELss

nr	LP filter kHz	SEL _{ss,VHF} dB re 1 μPa ² s
1	44	111
2	6.3	108
3	3.2	104
4	1.5	98
5	1.0	94
6	0.5	90



› EFFECT VAN FREQUENTIEWEGING

- › Bruinvis-gewogen SELss neemt sterker af met afstand dan ongewogen SELss
- › Bruinvis-gewogen SELss neemt sterker af door mitigatie (zoals bellenschermen) dan ongewogen SELss
- › Realistischer schatting van verstoringafstand?



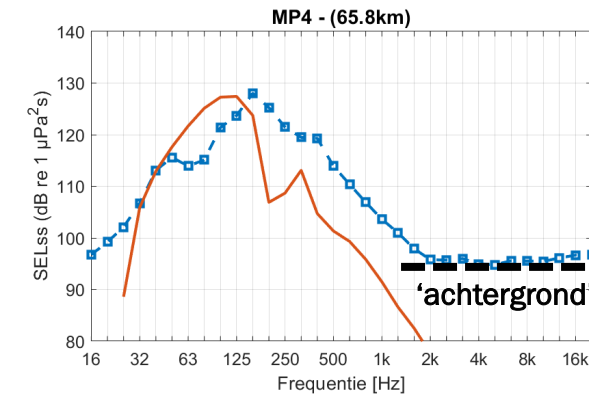
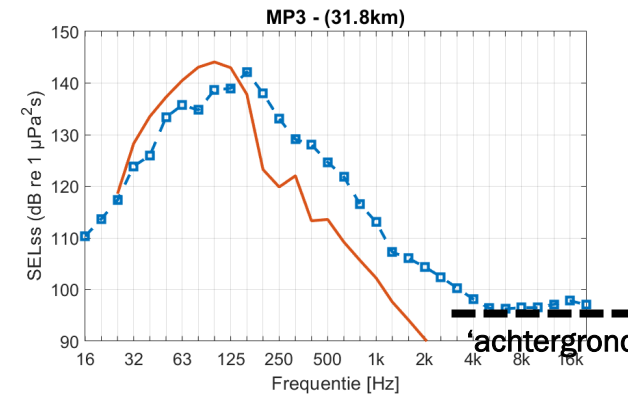
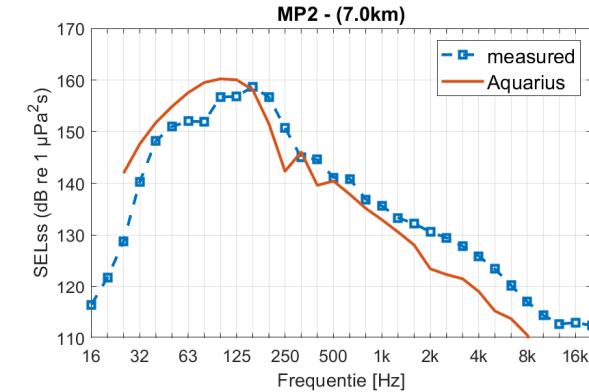
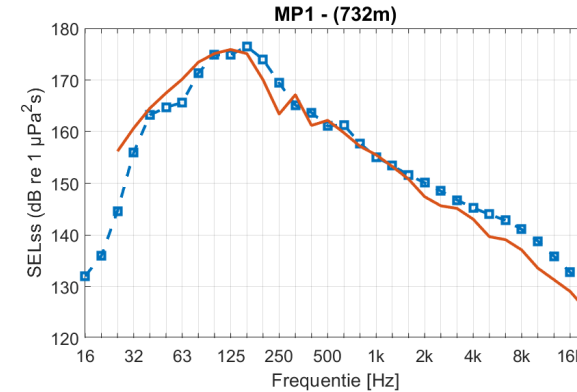
› **TOEPASSING FREQUENTIEWEGING IN KEC ?** **WAT MOET DAARVOOR GEBEUREN?**

1. Gewogen SELss van heiklappen kunnen modelleren
2. Gewogen SELss van heiklappen kunnen meten
3. Dosis-effect relatie hebben voor verstoring als functie van gewogen SELss



› (1) GEMINI AQUARIUS BEREKENING EVALUATIE VAN MODELONZEKERHEID

- › Bronmodel lijkt OK
 - › ongewogen en gewogen breedband 750 m
- › Gevoelig voor keuze bodemparameters
- › propagatieverlies >125 Hz overschat
 - › gewogen breedband onderschat

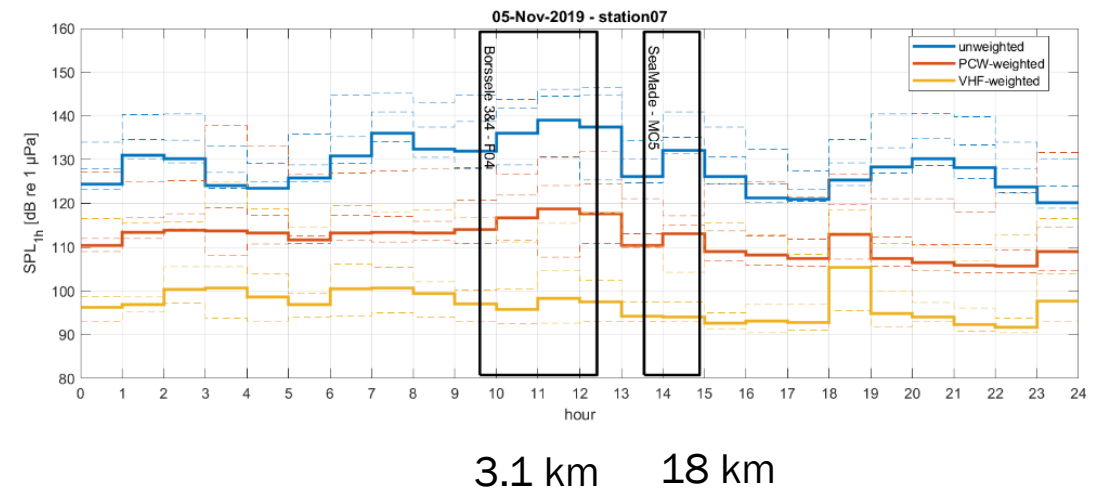
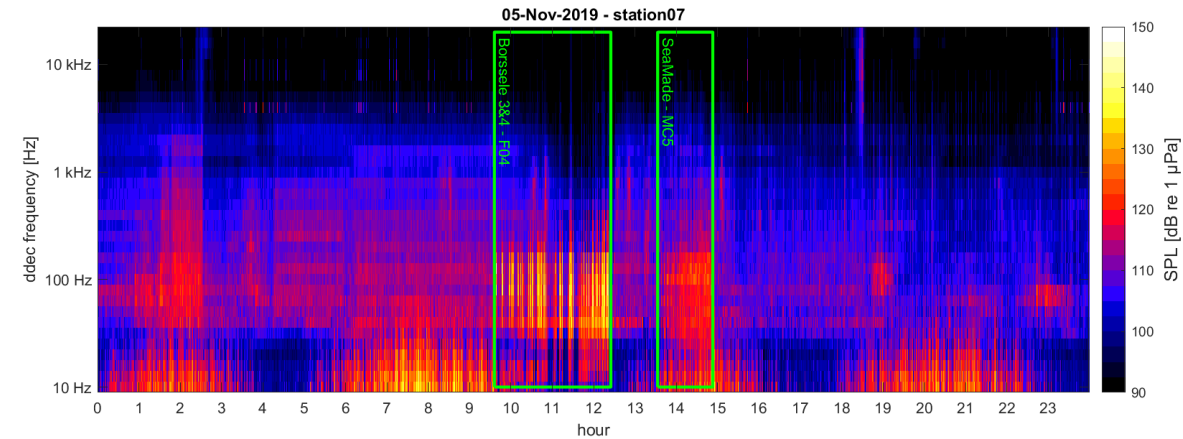


	SEL _{ss,unw} [dB re 1 µPa ² s]				SEL _{ss,VHF} [dB re 1 µPa ² s]			
Location	MP1	MP2	MP3	MP4	MP1	MP2	MP3	MP4
Measured	182	164	149	136	141	120	102	100
Model V1b	182	167	150	133	137	111	79	66
Difference	0	3	1	-3	-4	-9	-23	-34



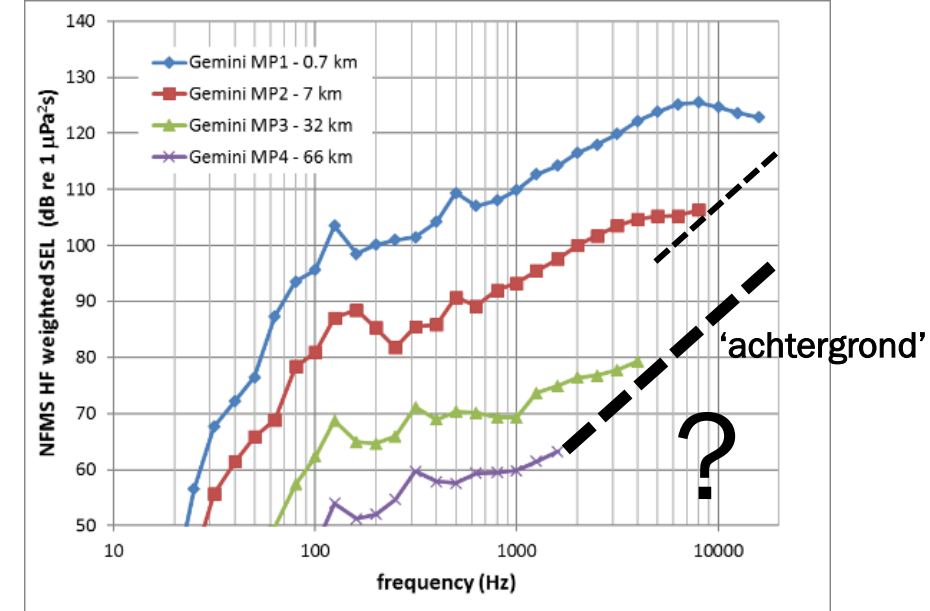
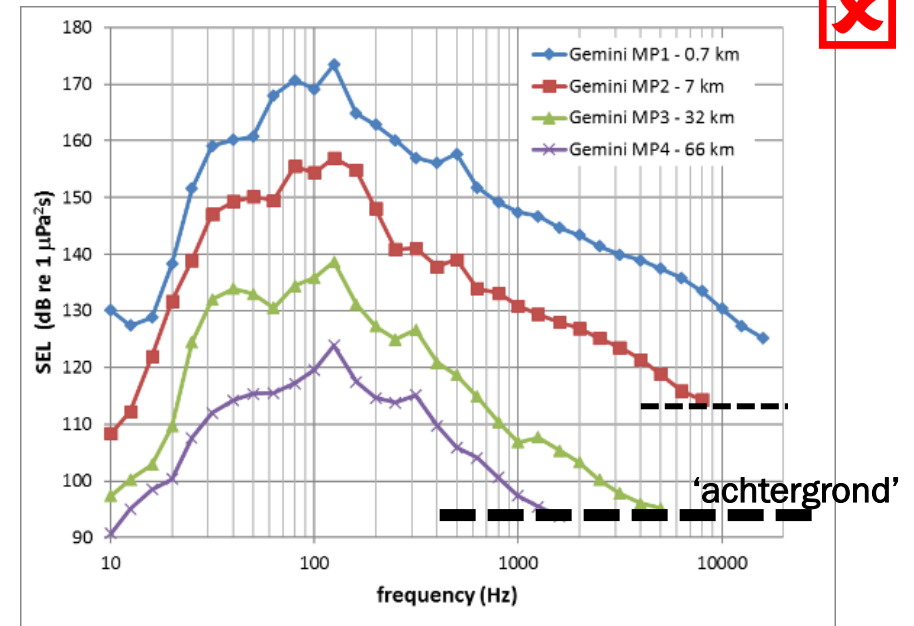
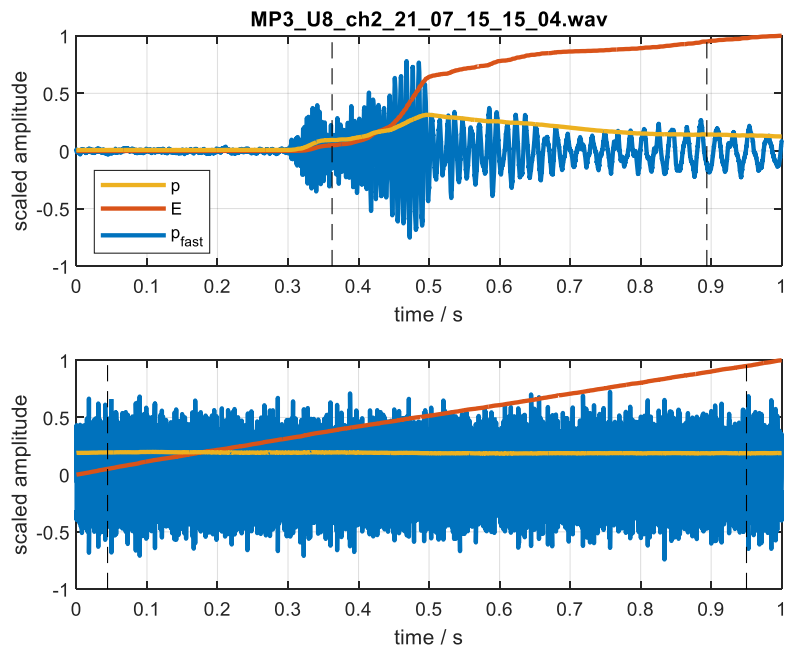
› (2) BORSSELE METINGEN

- › Heien met geluidnorm
 - › Toepassing van bellenschermen en mantels rond de paal (AdBm en HSD)
- › Drukke omgeving, veel scheepvaart
- › Hoge achtergrondgeluid-niveaus
- › Heigeluid op 3 km afstand alleen zichtbaar beneden 1 kHz
 - › Nauwelijks meetbaar in bruinvis-gewogen SPL



(2) GEMINI METINGEN

- › Hoogfrequent geluid en VHF-gewogen SELs gemaskeerd in metingen op grotere afstand



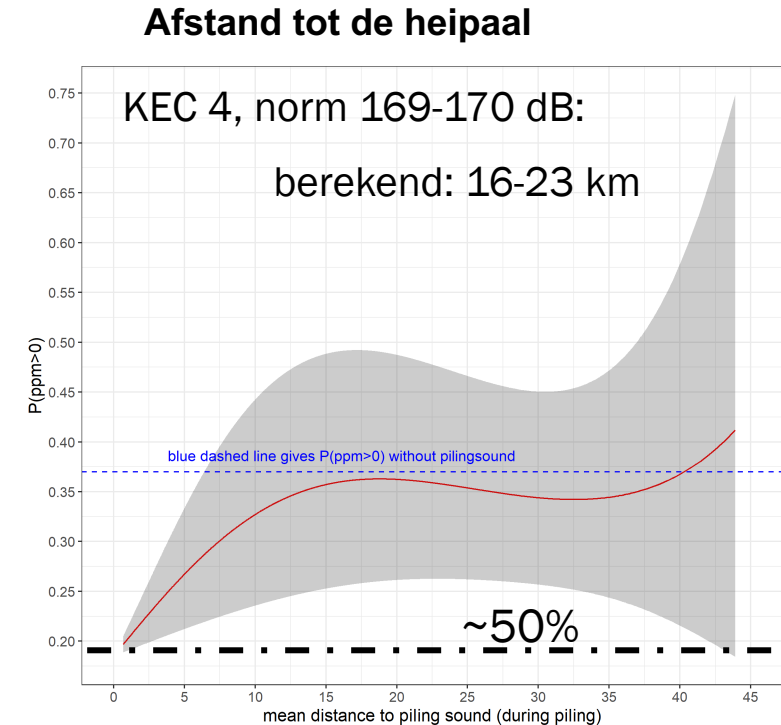
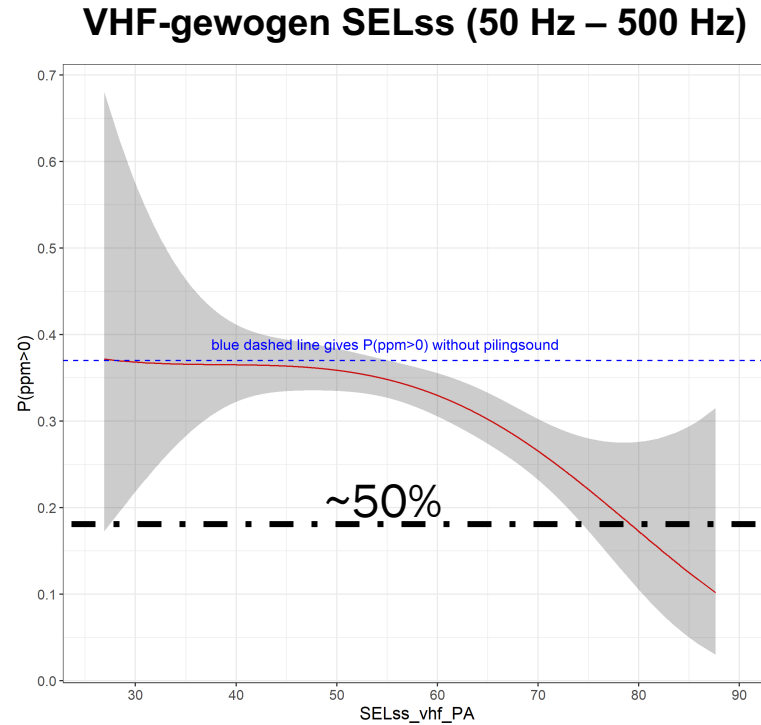
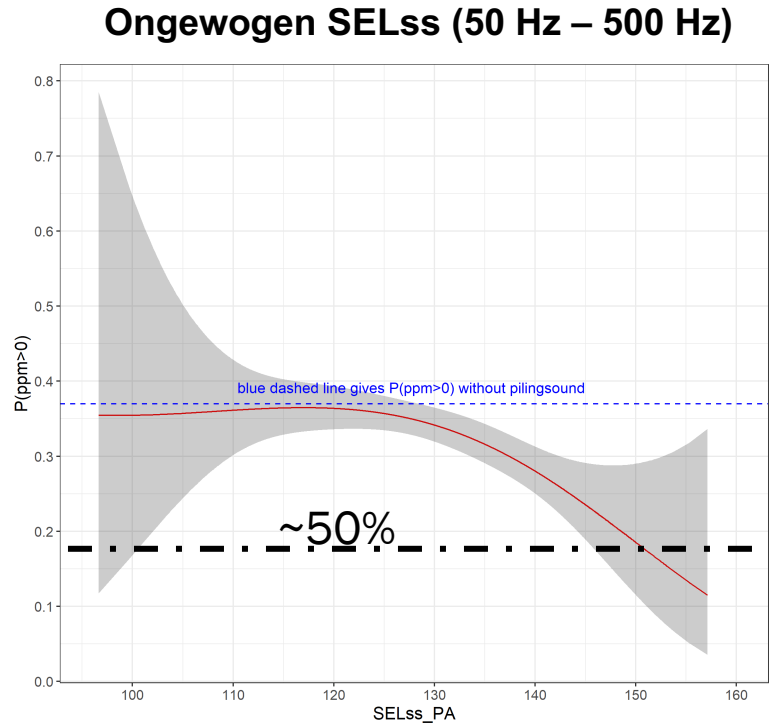


› (3) 'DREMPELWAARDEN' VOOR VERSTORING GEWOGEN EN ONGEWOGEN

		unweighted SEL _{SS} in dB re 1 μPa ² s	VHF-weighted SEL _{SS} in dB re 1 μPa ² s
BMU 2013 'disturbance'	Free	140 dB	80 dB
Brandt et al 2016 'negative effects'	Free	143 dB	83 dB
Brandt et al 2016 '50% decline'	Free	150-160 dB	90-100 dB
Kastelein et al 2013 'jumping'	Captive	136 dB	97 dB
Kastelein et al 2022 '>respirations'	Captive	134 dB	~100 dB
DK guideline		?	~94 dB
NL KEC behavioural threshold		140 dB	?

Assuming that the spectral distribution for the DE studies equals that from the measurements at Gemini at 32 km distance.

› (3) EFFECT VAN HEIGELUID OP BRUIVISSEN - BORSSELE



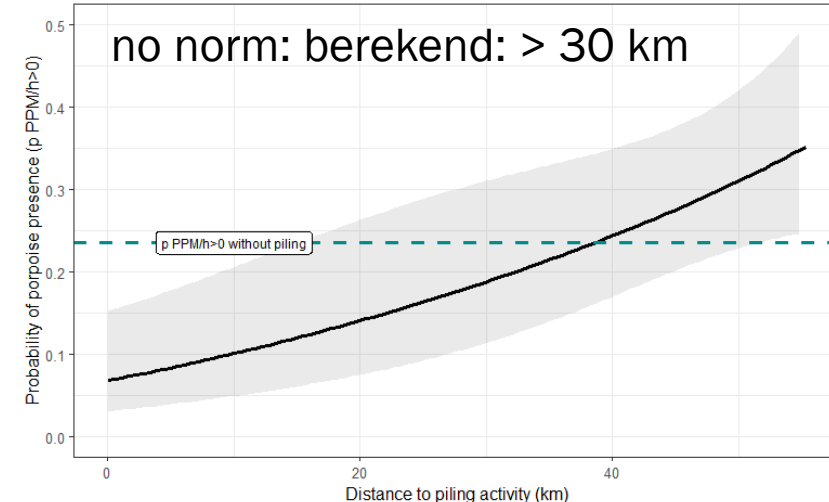
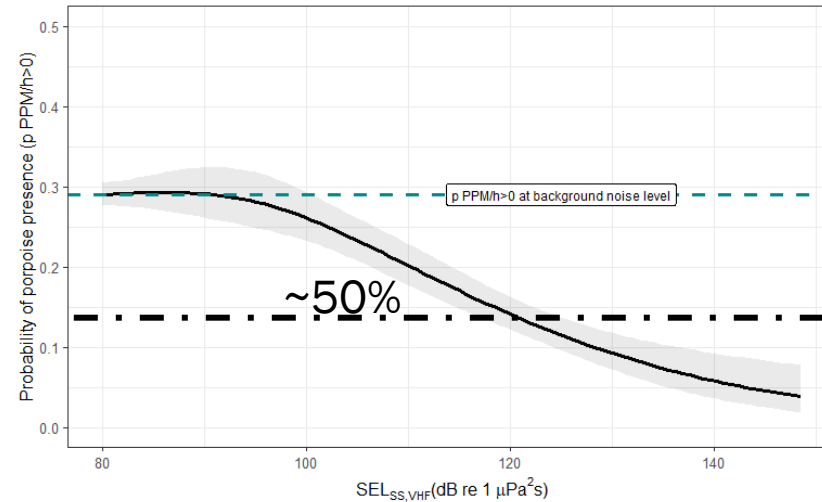
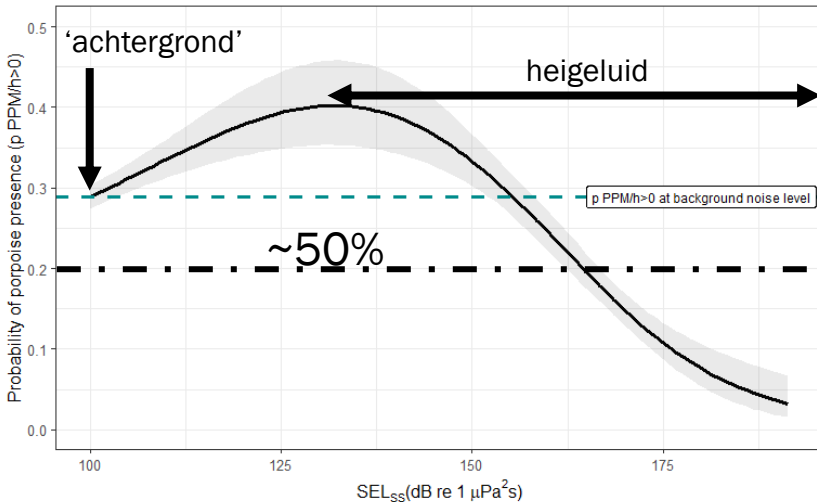
- › Duidelijk effect, maar geen duidelijk verschil betrouwbaarheid van SELss-modellen
- › Afstand-model minder robuust

› (3) EFFECT VAN HEIGELUID OP BRUIVISSEN - GEMINI

Ongewogen SELss (10 Hz – 20 kHz)

VHF-gewogen SELss (10 Hz – 20 kHz)

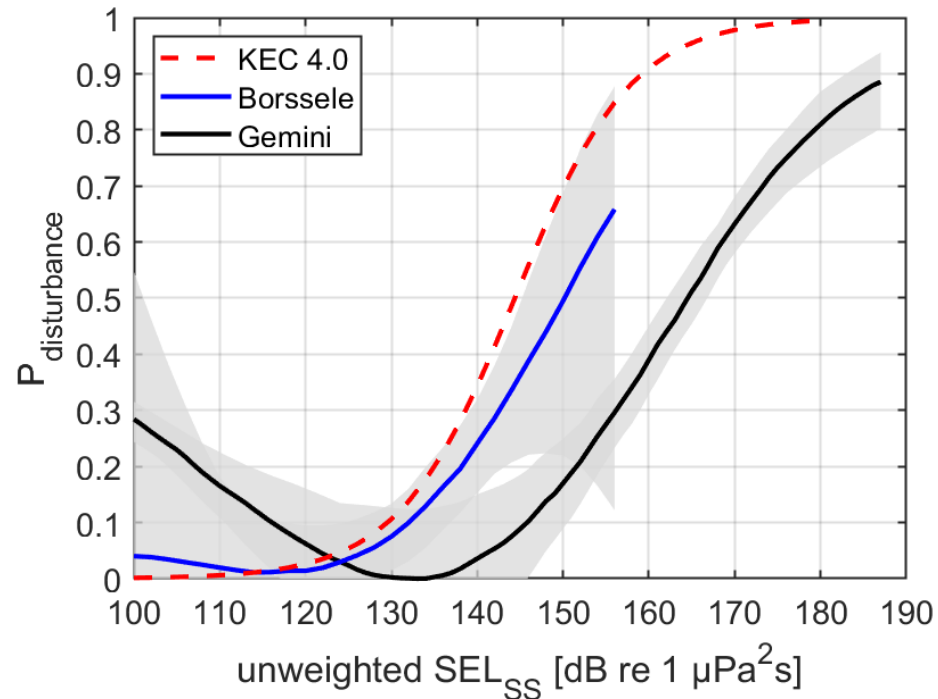
Afstand tot de heipaal



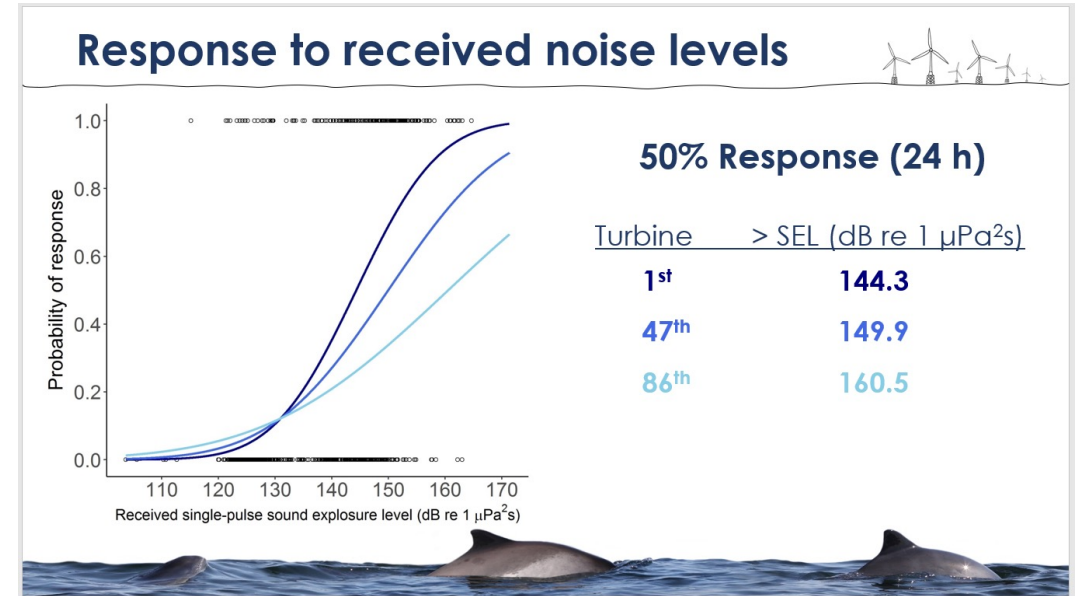
- › Duidelijk effect, maar geen duidelijk verschil betrouwbaarheid van SELss-modellen
- › Afstand-model minder robuust

› DOSIS-EFFECT RELATIE - ONGEWOGEN SEL

- › Voorlopig geschat uit Bernoulli modellen Borssele & Gemini (ongewogen SELss)
- › Geldigheid nog onzeker

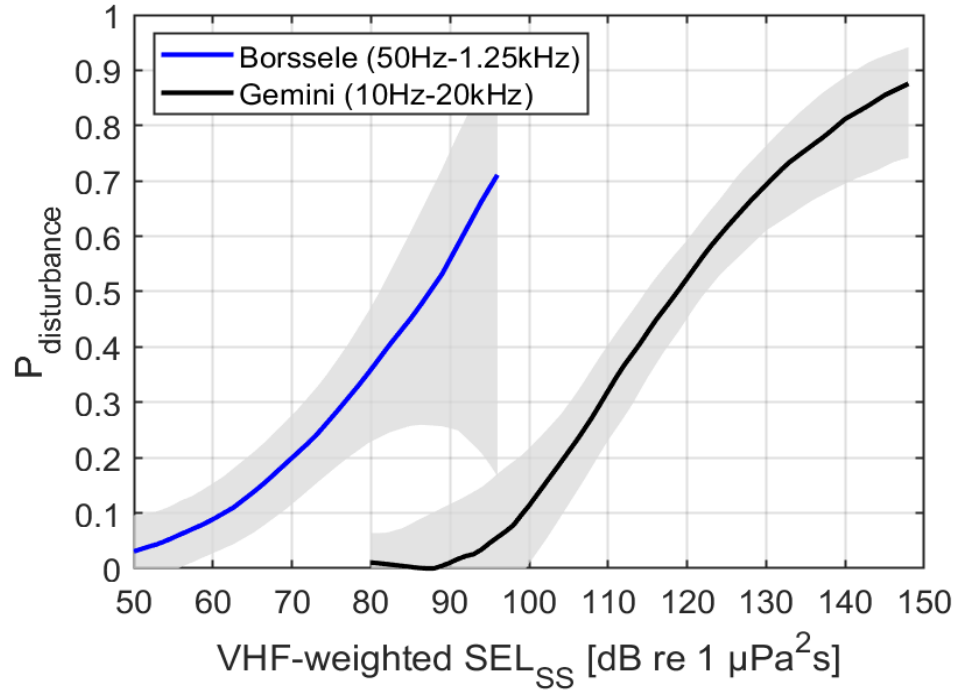


Graham et al, INPAS 2018

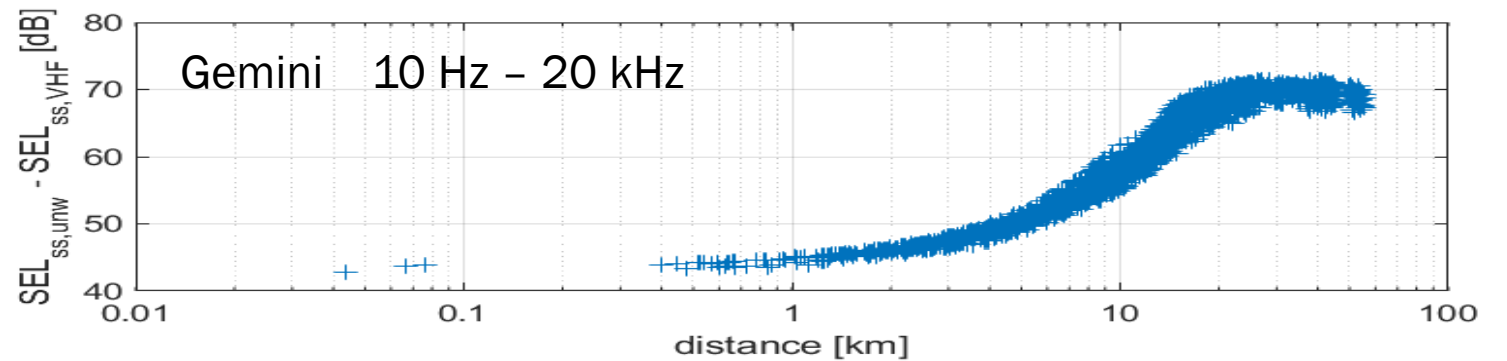
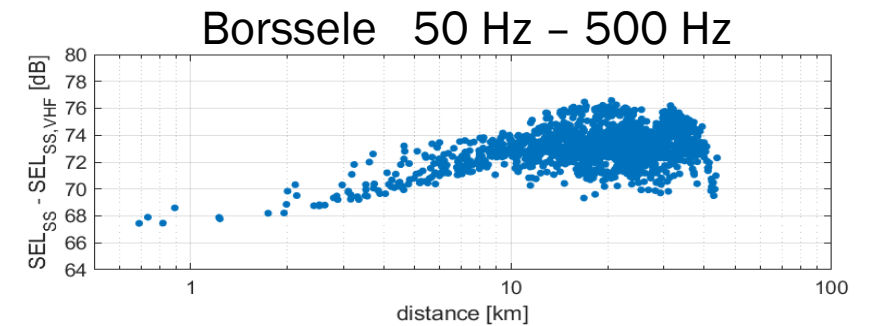


- › KEC curve afgeleid uit responscurve voor 1ste turbine

› GEWOGEN SEL IS NIET VERGELIJKBAAR



- › Mitigatie
- › Maskering
- › Andere frequentie-bandbreedte
- › Andere afstanden



› DISCUSSIE - BLOOTSTELLINGSMAAT

- › Huidige regelgeving gebruikt ongewogen SELss
- › Gewogen SELss is niet eenvoudig toepasbaar
- › (Nog?) geen direct bewijs dat gewogen SELss een betere voorspelling van gedrag geeft

	Ongewogen SELss	VHF-gewogen SELss
Meetbaar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Modelleerbaar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Dosis-effect relatie	<input checked="" type="checkbox"/> / ?	<input checked="" type="checkbox"/>

› CONCLUSIE / DISCUSSIE

- › Op dit moment zal overgaan naar toepassing van gewogen SELss als maat niet leiden tot een reductie van onzekerheid in de KEC methodiek
 - › Akoestische modellering en meting is onzekerder voor de gewogen maat
 - › De ‘gemeten’ dosis-effect relaties voor ongewogen en gewogen SELss lijken even robuust
- › Onzekerheid in dosis-effect relatie voor ongewogen SELss
 - › KEC-curve lijkt ‘voorzichtig’
- › Verder onderzoek is gewenst:
 - › Internationale afstemming en kennis- en data uitwisseling
 - › Onderzoek naar effecten van maskering
 - › Toepassing van SPL-maten

› ÉÉN SPL-DREMPEL VOOR GELUIDSVERSTORING ? IMPULSIEF EN CONTINU ?

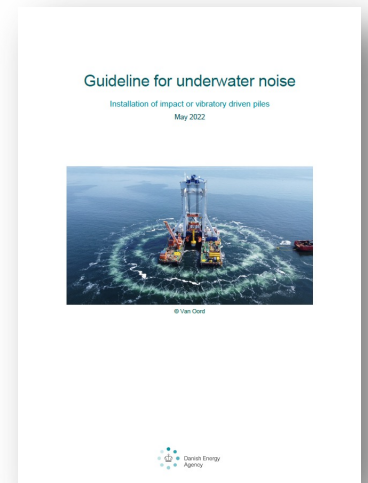
› maximum time-weighted SPL

$$L_{p,\tau,T} = \max_T \left(10 \log_{10} \left\{ \frac{\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t p^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi}{p_0^2} \right\} \text{ dB} \right)$$

exponentieel gewogen

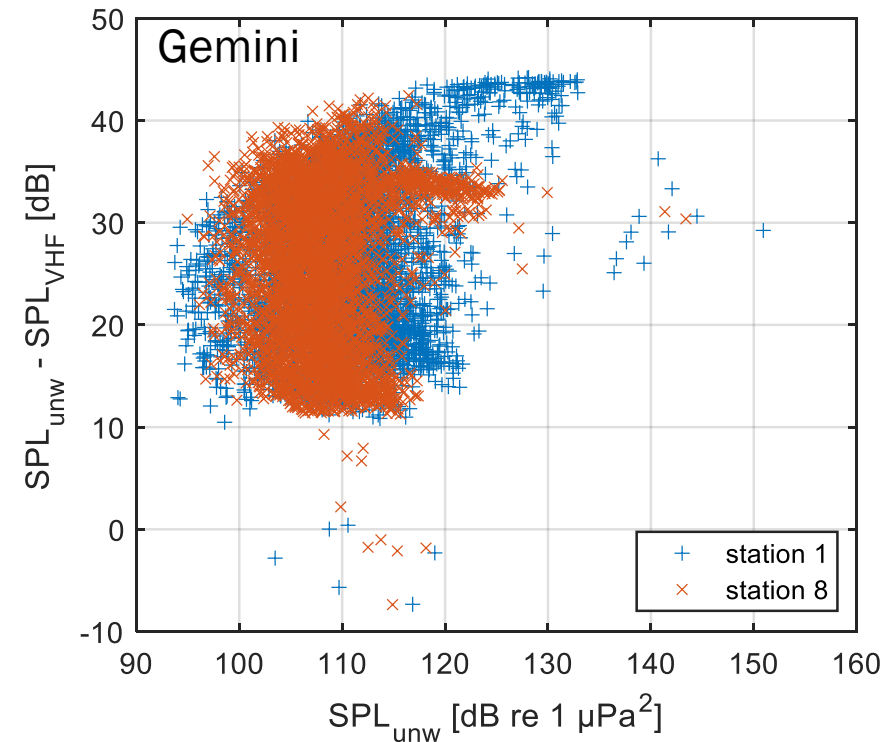
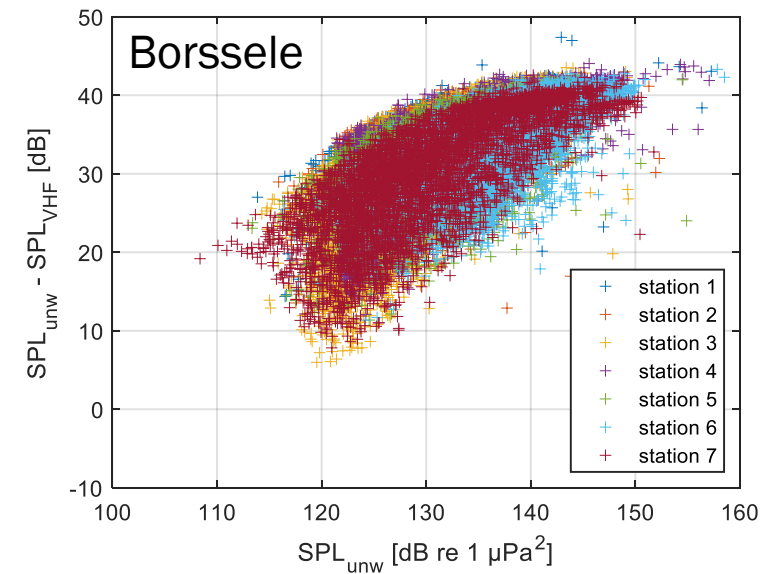
time constant τ ('FAST' $\tau = 125$ ms, 'SLOW' $\tau = 1$ s), zie IEC 61672-1

- › Alle geluid, of alleen heigeluid
- › Gewogen of ongewogen



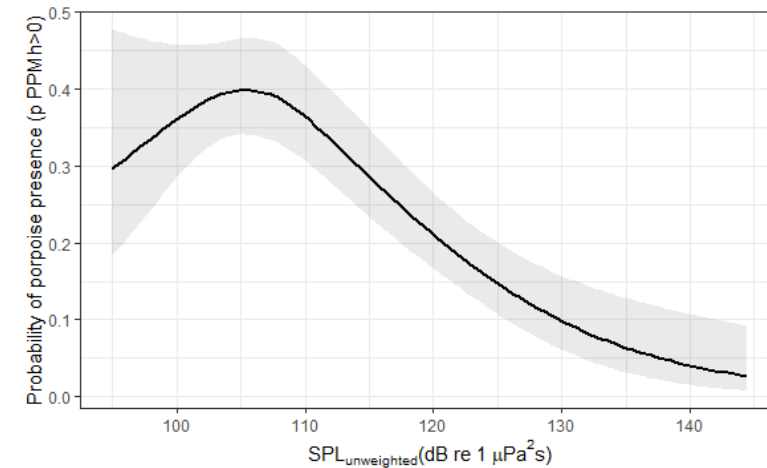
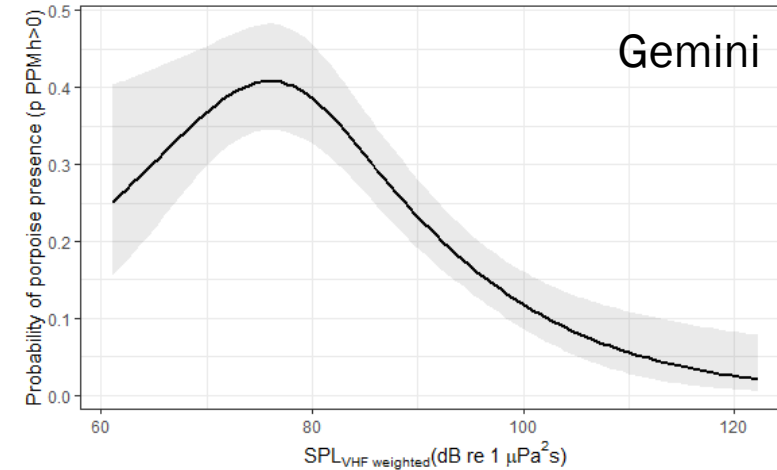
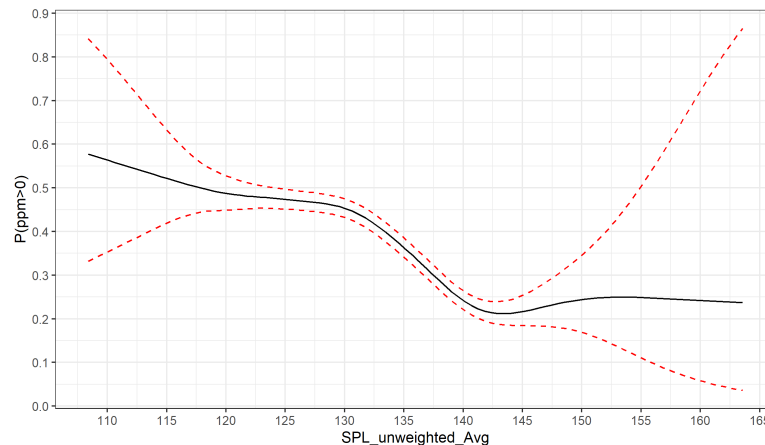
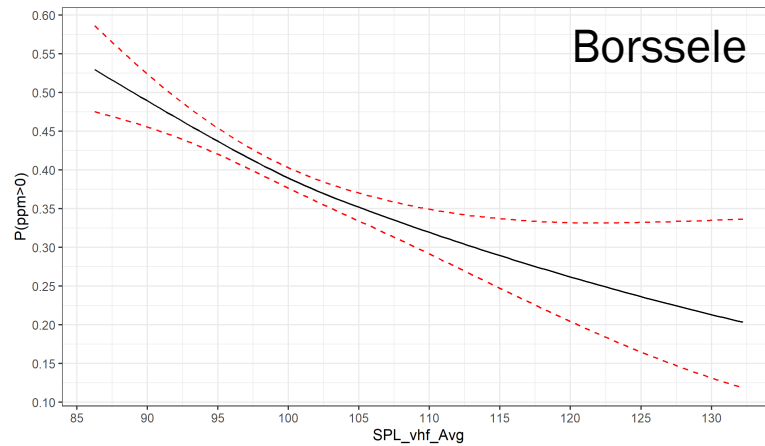
› SPL EN WEGING

- › Alle geluid: minder duidelijke relatie tussen ongewogen en gewogen SPL
- › Borssele: veel scheepvaart én heien (T-c)
- › Gemini: vóór heiwerkzaamheden (T-0)
- › Geluidniveaus bij Borssele veel hoger



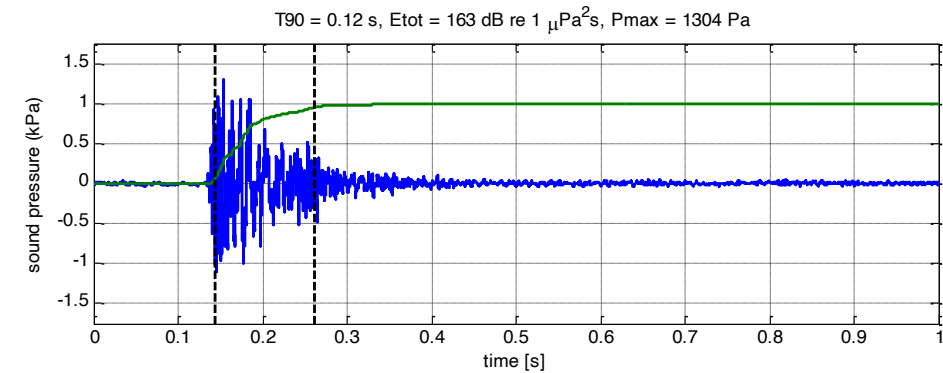
› EFFECT VAN ONDERWATERGELUID OP BRUIVISSEN

- › Detecties nemen af bij toenemende geluidniveaus
- › Minder robuust voor ongewogen SPL dan voor gewogen SPL



› **BACKUP SLIDES**

› GELUIDMATEN



› Impulsgeluid: SEL

$$L_{E,T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^T p^2 dt}{p_0^2 t_0} \right\} \text{ dB}$$

› Continugeluid: SPL

$$L_{p,T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}{p_0^2} \right\} \text{ dB}$$

› Beide: maximum time-weighted SPL

$$L_{p,\tau,T} = \max_T \left(10 \log_{10} \left\{ \frac{\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t p^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi}{p_0^2} \right\} \text{ dB} \right)$$

time constant τ ('FAST' $\tau = 125$ ms, 'SLOW' $\tau = 1$ s), zie IEC 61672-1

› Ongewogen: gebaseerd op $p(t)$

› Gewogen: gebaseerd op $p_w(t)$

bruinvis: Southall et al 2019 'VHF'

› DENEN GEBRUIKEN VHF-WEGING

- › “the stated PTS thresholds shall not be exceeded for a fleeing animal”
- › “Only if $r_{ADD,behav}$ is smaller than r_{behav} of the piling source, use of the specific ADD is permitted.”

I-type sounds					
Species (English)	Species (Danish)	Weighting	Threshold type		
			PTS	TTS	Behavioural Disturbance
			SEL_{cum} $L_{E,p,xx,24h}$	SEL_{cum} $L_{E,p,xx,24h}$	$SPL L_{p,rms,125ms}$
Harbour porpoise	Marsvin	VHF	155	140	103
White-beaked dolphin	Hvidnæse	HF	185	170	-
Pilot whale	Grindehval	HF	185	170	-
Minke whale	Vågehval	LF	183	168	-
Harbour seal	Spættet sæl	PCW	185	170	-
Grey seal	Gråsæl	PCW	185	170	-

Table 3: Species of marine mammals commonly occurring in Danish waters with corresponding auditory groups and respective acoustic thresholds stated as SEL_{cum} in dB re $1 \mu Pa^2s$ and SPL in dB re $1 \mu Pa$. Only thresholds for I-type sounds are shown.

Guideline for underwater noise

Installation of impact or vibratory driven piles

May 2022



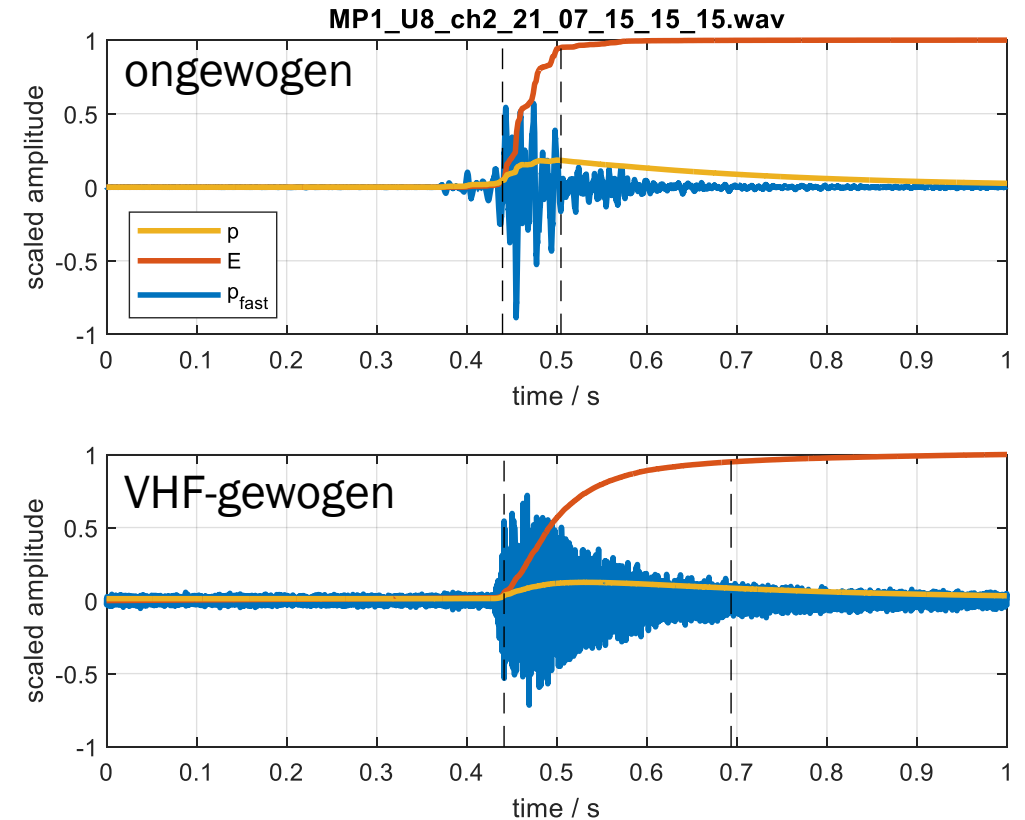
© Van Oord



AKOESTISCHE ANALYSE VAN HEIGELUID

GEMINI U8, MP1 - 732 m

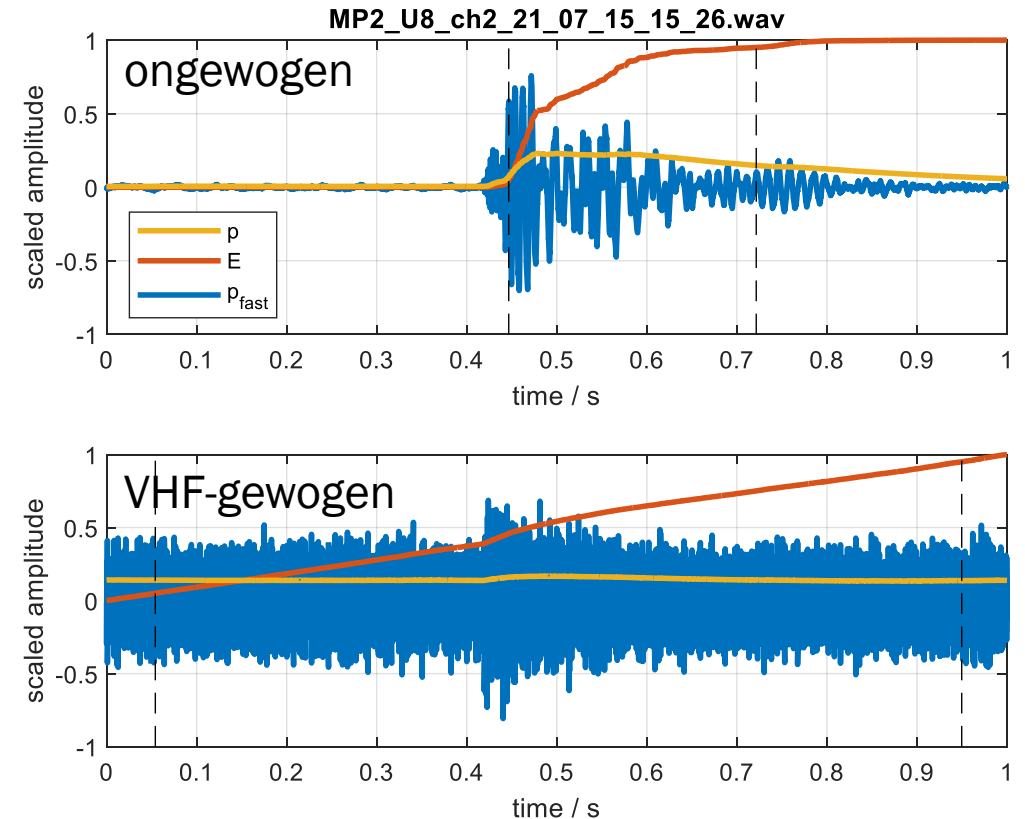
- › Exposure : $E = \int_0^T p^2 dt$
- › SELss : $L_E = 10 \log_{10}(E/E_0)$ dB
- › Duur : $T_{90} = t(E = 0.95E_{\text{tot}}) - t(E = 0.05E_{\text{tot}})$
- › 'fast' : exponentieel gemiddeld over 125 ms
- › $\max(L_{p,\text{vhf,fast}})_{1s}$: maximum waarde in 1s venster
- › *VHF-gewogen klap duurt langer*
- › Ongewogen SEL heiklap **49 dB** boven achtergrond
- › VHF-gewogen SELss heiklap **15 dB** boven achtergrond



AKOESTISCHE ANALYSE VAN HEIGELUID

GEMINI U8, MP2 - 7 km

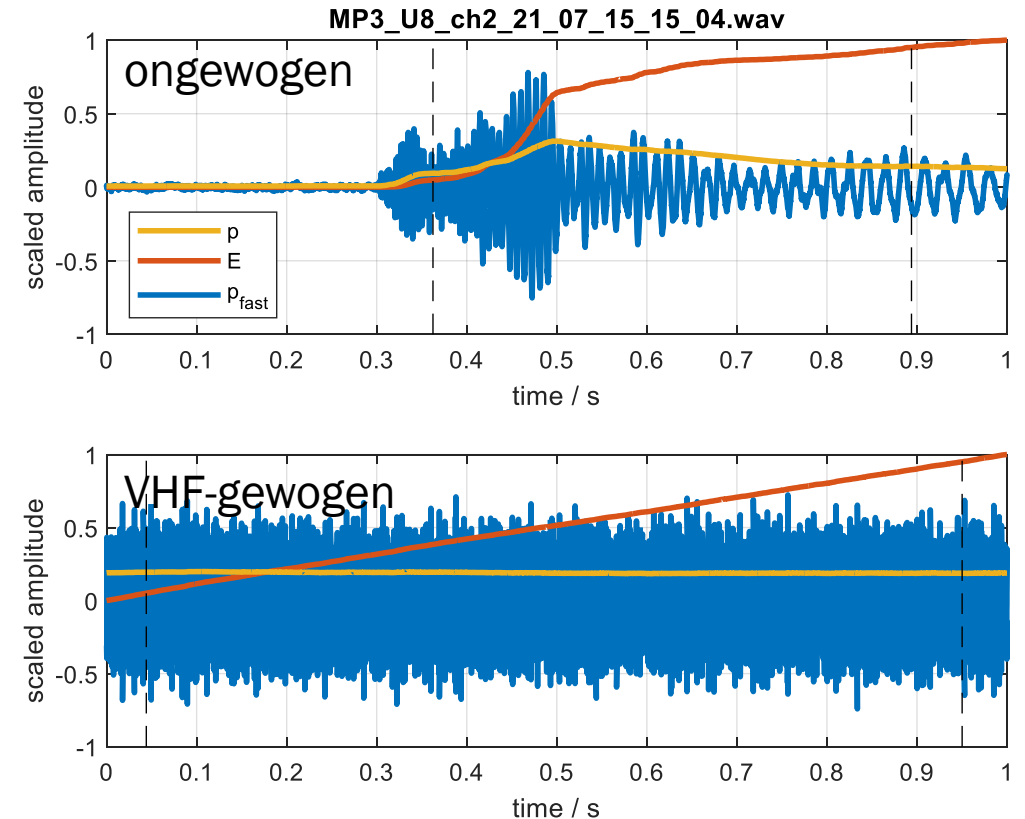
- › Exposure : $E = \int_0^T p^2 dt$
- › SELss : $L_E = 10 \log_{10}(E/E_0)$ dB
- › Duur : $T_{90} = t(E = 0.95E_{tot}) - t(E = 0.05E_{tot})$
- › 'fast' : exponentieel gemiddeld over 125 ms
- › $\max(L_{p,vhf,fast})_{1s}$: maximum waarde in 1s venster
- › *VHF-gewogen signaal nauwelijks zichtbaar*
- › Ongewogen SEL heiklap **30 dB** boven achtergrond
- › VHF-gewogen SELss heiklap **1 dB** boven achtergrond



AKOESTISCHE ANALYSE VAN HEIGELUID

GEMINI U8, MP3 - 32 km

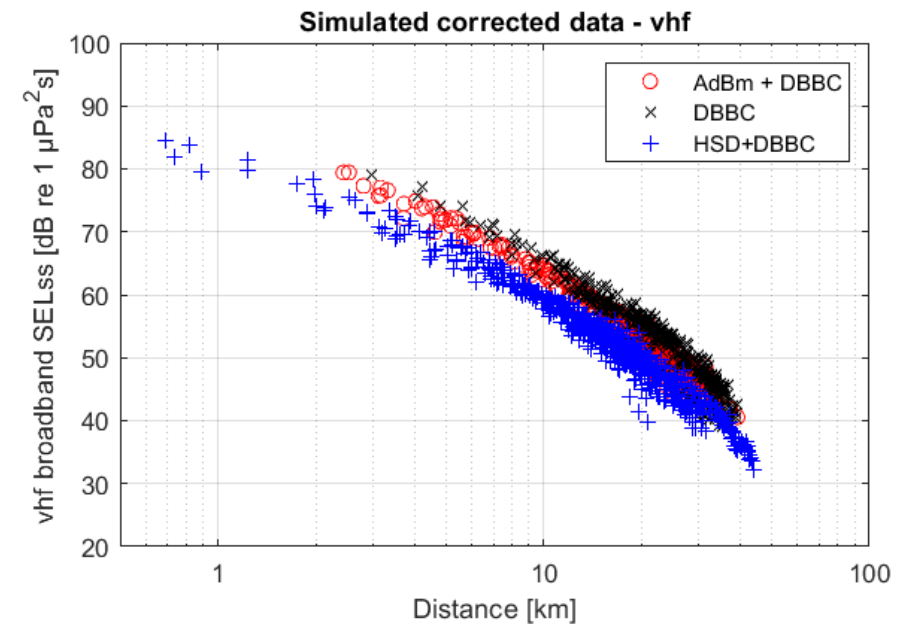
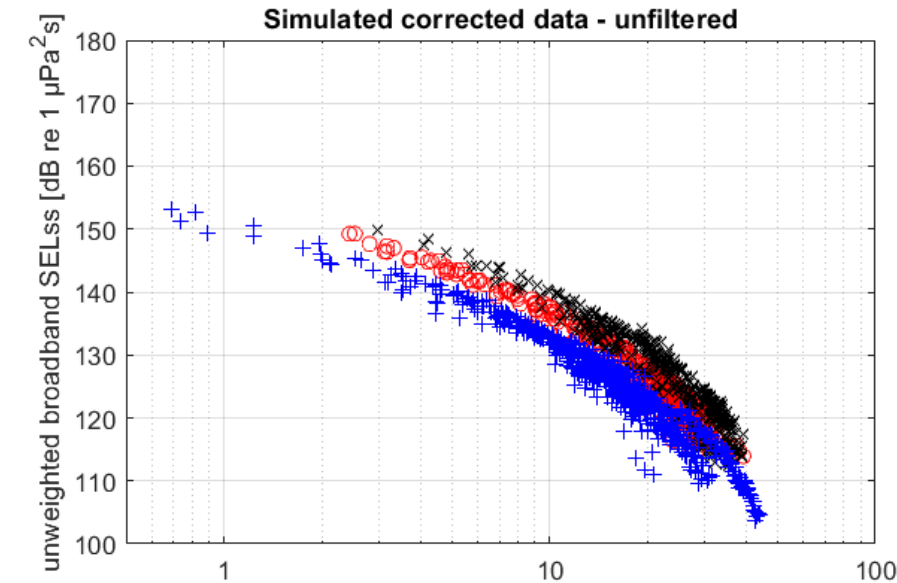
- › Exposure : $E = \int_0^T p^2 dt$
- › SELss : $L_E = 10 \log_{10}(E/E_0)$ dB
- › Duur : $T_{90} = t(E = 0.95E_{tot}) - t(E = 0.05E_{tot})$
- › 'fast' : exponentieel gemiddeld over 125 ms
- › $\max(L_{p,vhf,fast})_{1s}$: maximum waarde in 1s venster
- › *VHF-gewogen signaal niet detecteerbaar*
- › Ongewogen SEL heiklap 28 dB boven achtergrond
- › VHF-gewogen SEL niet meetbaar



› BORSSELE BEREKENINGEN

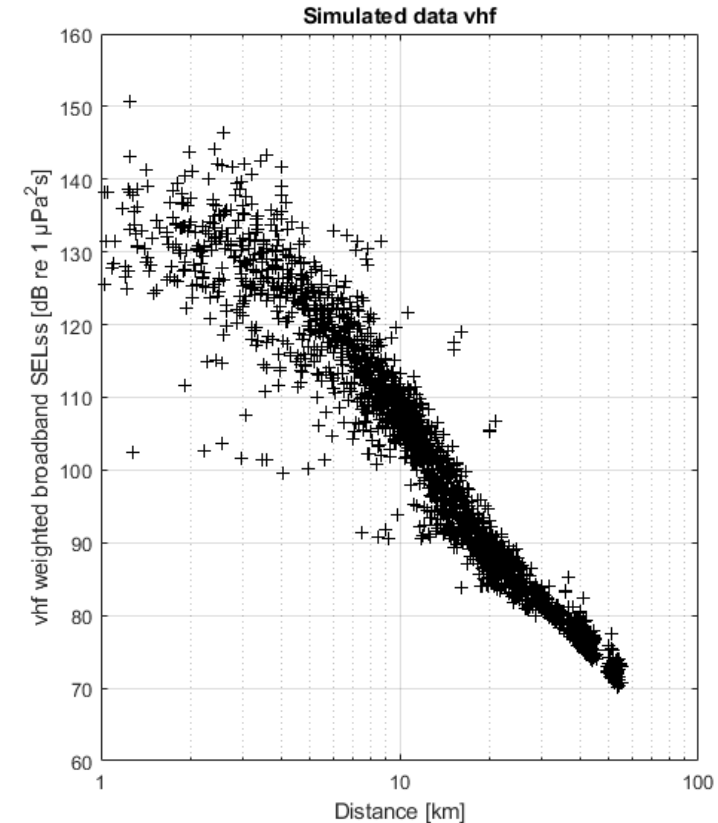
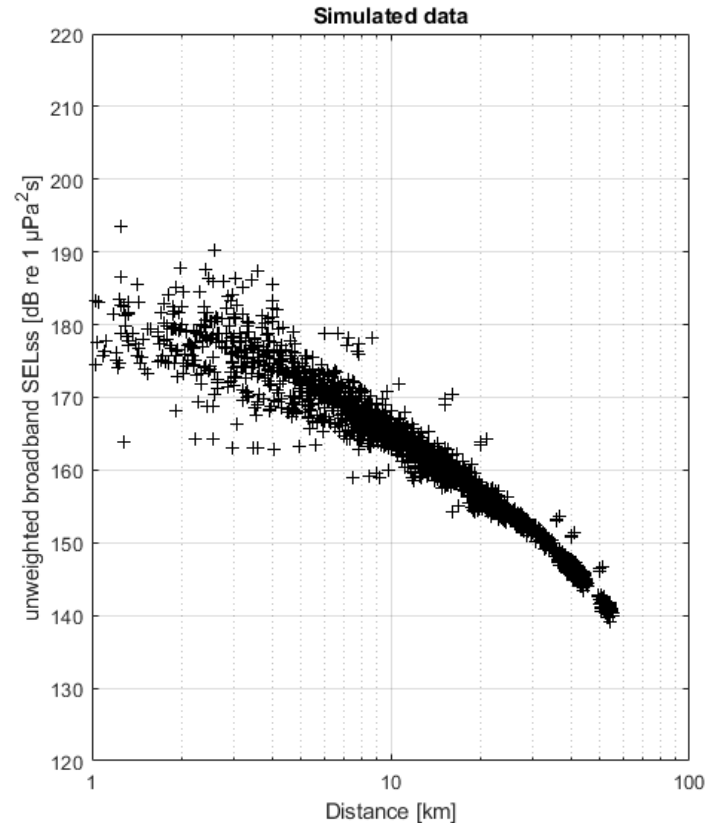
- › TNO: Aquarius met mitigatiecorrectie: $\langle \text{SELss} \rangle_{\text{hr}}$
- › WMR: “a Bernoulli GAMM with complementary log-log link function, modelling the presence (ppm>0) or absence (ppm=0) of the porpoise positive minutes.”
- › Control variables :
 - › month of the year
 - › hour of the day
 - › water temperature
 - › tidal flow magnitude
 - › wind speed
 - › CPOD ID (random effect)

Model broadband (50 Hz – 500 Hz) SELss



› GEMINI BEREKENINGEN

- › TNO: Aquarius (V1a): $\langle \text{SELss} \rangle_{\text{hr}}$
- › WMR: “GAMM with quasi-Poisson error structure and restricted maximum likelihood method”
 - maximum 4 basic functions (k) for all variables for interpretability
- › Control variables :
 - › hour of the day (cyclic)
 - › water temperature
 - › tidal height
 - › wind speed
 - › CPOD ID (random effect)





› **BEDANKT VOOR
UW AANDACHT**

TNO innovation
for life