

DRIJVENDE ZONNEPARKEN OP RIJKSGROND

Referentieontwerp drijvend zonnepark

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving

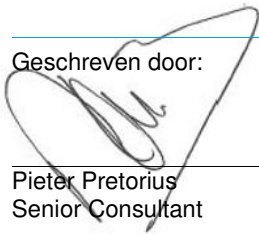
Rapport nr.: 23-0682, Rev. 0

Datum: 26-04-2023



Projectnaam:	Drijvende zonneparken op rijksgrond	Energy Systems
Rapport titel:	Referentieontwerp drijvend zonnepark	DNV Netherlands B.V.
Klant:	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving,	Utrechtseweg 310-B50
Contactpersoon klant:	Bob Roessink	6812 AR Arnhem
Datum uitgave:	26-04-2023	
Project nr.:	10382339	
Organisatie unit:	Solar & battery storage Northern Europe	Tel: 026 356 9111
Rapport nr.:	23-0682, rev.	Handelsregister Arnhem 09006404

Geschreven door:



Pieter Pretorius
Senior Consultant

Beoordeeld door:



Jasper Lemmens
Senior Consultant

Goedgekeurd door:



Rob van Dijk

Geschreven door:



Fred Koenis
Senior Consultant

Geschreven door:



Robert Heuckelbach
Senior Consultant

Copyright © DNV 2023. All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited.

DNV Distributie:

- Open
 Intern
 Commercieel vertrouwelijk
 Vertrouwelijk
 Geheim

*Specificatie distributie: --

Trefwoorden:

Rev.	Datum	Reden van uitgave	Auteur	Beoordeeld	Goedgekeurd
0	2023-04-26	Eerste uitgave	Robert Heuckelbach	Jasper Lemmens	Rob van Dijk

Inhoudsopgave

1	INLEIDING	2
2	ELEKTRISCHE VEILIGHEID	4
3	REFERENTIEONTWERP DRIJVEND ZONNEPARK	7
4	OPSTELLING REFERENTIEONTWERP	27
5	BEVEILIGING	33
6	FOUTSCENARIO'S	35
7	EMC	41
8	ZWEMWATERVEILIGHEID	41
9	REFERENTIES	43
Appendix A	Single line diagrammen van varianten	
Appendix B	Single line diagram van één drijvend PV-veld	
Appendix C	Concepttekening van een drijvend zonnepark op het Laagbekken van de Krammer	
Appendix D	Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 1: Veiligheidscriteria	
Appendix E	Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 2: Numerieke modellen voor zwemmers	
Appendix F	Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 3: Criteria veiligheidsbeoordeling	
Appendix G	Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 4: Minimale veilige afstand	

GEBRUIKTE AFKORTINGEN

Afkorting	Omschrijving
AC	Alternating current (wisselstroom)
DC	Direct current (gelijkstroom)
PV	Photo Voltaic (Fotovoltaïsch)
FPV	Floating Photo Voltaic (drijvend fotovoltaïsch)
ESD	Electric Shock Drowning
HS	Hoogspanning
IMD	Isolation Monitoring Device
IT	Isolé Terre (IT-stelsel)
LS	Laagspanning
MPP	Maximum Power Point
MS	Middenspanning
MW	Megawatt
TN	Terre Neutre (TN-stelsel)
PE	Protective earth (aardedraad)

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Binnen het programma 'Hernieuwbare energie op rijksgrond' wil de rijksoverheid op eigen grondgebied zonneparken en windturbines aanleggen.¹ Dit gebeurt op locaties die al een (rijks)functie hebben, zoals in bermen en op knooppunten van snelwegen, nabij sluizen en op baggerdepots. Marktpartijen zullen deze zonneparken (of windturbines) gaan ontwikkelen, terwijl in de voorbereiding nauw wordt samengewerkt met de overheid. De marktpartij zal voor zo'n park een ontwerp maken en zal ook zorgdragen voor de bouw en de exploitatie. Hiermee draagt het Rijk als beheerder en eigenaar van veel gronden en wateren bij aan de energietransitie in Nederland. Rijkswaterstaat is hierbij, als beheerder van veel snelwegen, vaarwegen, sluizencomplexen en baggerdepots in Nederland, een belangrijke stakeholder.

De bedoeling is dat binnenkort nabij de sluizencomplexen Krammer en Kreekrak (beide in Zeeland) en op baggerdepot de Slufter (op de Maasvlakte) drijvende zonneparken worden aangelegd. Deze drie objecten worden door Rijkswaterstaat beheerd. Randvoorwaarde hierbij is dat de primaire functie van deze objecten behouden blijft. Zo mogen de drijvende zonnepanelen het vaarverkeer in de buurt niet in gevaar brengen en moet een baggerdepot ook in de toekomst zijn functie kunnen blijven behouden. Momenteel werkt Rijkswaterstaat aan het opstellen van een breed pakket van eisen waaraan de drijvende parken moeten voldoen. Deze eisen zullen ook worden gebruikt voor mogelijk toekomstige drijvende zonneparken op door Rijkswaterstaat beheerde wateren in de rest van Nederland.

Rijkswaterstaat heeft DNV gevraagd om ten behoeve van deze ontwikkeling specifieke eisen op te stellen die betrekking hebben op de (elektrische) zwemwaterveiligheid en op elektromagnetische compatibiliteit (EMC). Deze eisen zullen worden toegevoegd aan het hierboven genoemde brede pakket van eisen dat Rijkswaterstaat momenteel opstelt.

Bij zwemwaterveiligheid gaat het vooral om elektrische veiligheid. Voorkomen moet worden dat zwemmers een elektrische schok kunnen krijgen wanneer ze nabij of in aanraking met de infrastructuur van het drijvend zonnepark komen of kunnen verdrinken door *electric shock drowning*. De onderdelen van het drijvende zonnepark moeten afdoende beveiligd zijn om fatale ongevallen te voorkomen. Zwemwaterveiligheid speelt een rol nabij de Krammersluizen en de Kreekraksluizen (maar uiteraard niet bij baggerdepot de Slufter).

Bij EMC gaat het erom de elektromagnetische beïnvloeding in en tussen elektrische en elektronische producten of systemen te voorkomen en desnoods te bestrijden. Bekend is dat de omvormers van een zonnepark verstoring kunnen veroorzaken van andere apparatuur. Dit is niet gewenst, zeker niet als het om belangrijke communicatiesystemen gaat. Specifieke eisen met betrekking tot EMC worden in een separaat rapport besproken /2/.

In dit rapport worden enkele referentieontwerpen gepresenteerd van een drijvend zonnepark waarbij er één 'worst case' ontwerp gebruikt is in de simulaties voor zwemwaterveiligheid. Middels deze referentieontwerpen worden randvoorwaarden bepaald die leiden tot een minimaal niveau wat betreft elektrische veiligheid. Deze randvoorwaarden zijn vervolgens in een ander document opgenomen als specifieke eisen, die ook in het geval van andere ontwerpen toepasbaar zijn /6/.

1.2 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt ingegaan op het onderwerp 'elektrische veiligheid'. In dat hoofdstuk wordt ingegaan op de (directe en indirecte) risico's die er zijn bij het gebruik van (of werken met) elektrische installaties. Ook wordt aandacht besteed aan normen en wet- en regelgeving op dit gebied.

In hoofdstuk 3 zijn de elektrische referentieontwerpen van een drijvend zonnepark gepresenteerd. Het bevat basale uitgangspunten en vijf ontwerpvarianten waarbij afwegingen, risico's en keuzes uitgewerkt zijn.

¹ Zie verder: <https://www.energieoprijksgrond.nl/>.

In hoofdstuk 4 zijn de keuzes in hoofdstuk 3 concreet gemaakt voor een opstelling voor een drijvend zonnepark in het laagbekken bij de Krammersluizen ten behoeve van simulaties en berekeningen van de minimale veilige afstand voor zwemmers.

Hoofdstuk 5 bevat de bijbehorende keuzes voor de elektrische beveiliging en in hoofdstuk 6 is een overzicht opgenomen van de mogelijke foutscenario's en zijn de *worst case* scenario's bepaald voor zowel gelijkspanning als wisselspanning.

Hoofdstuk 7 bevat enkele voorzieningen voor het referentieontwerp die getroffen zijn om EMC-beïnvloeding te beperken.

Hoofdstuk 8 bevat een samenvatting van de uitgebreide analyse en resultaten van het onderzoek naar de minimale veilige afstand voor zwemmers. De volledige analyse en resultaten zijn opgenomen in de bijlage.

2 ELEKTRISCHE VEILIGHEID

2.1 Risico's van elektriciteit

Elektriciteit is niet weg te denken uit ons leven. Bij het gebruik van en het werken aan elektrische installaties bestaat echter altijd een zeker risico op letsel. De meeste ongelukken met elektrische installaties gebeuren door het werken met ondeugdelijk materiaal, of doordat gewerkt wordt zonder de juiste opleiding of voldoende kennis en ervaring. Zo is het bijvoorbeeld een misverstand dat alleen direct contact met elektriciteit gevaarlijk is. Bij hoge spanningen (vanaf 1000 volt) is te dicht naderen van een geleider ook al heel gevaarlijk, in verband met overslag.

Er kan bij het gebruik van elektriciteit onderscheid gemaakt worden tussen directe en indirecte gevaren of risico's:

- Directe risico's van elektriciteit:
 - stroom door het menselijk lichaam (schok);
 - verbranding door vlambogen bij kortsluiting;
 - statische elektriciteit;
 - elektromagnetische velden.
- Indirecte risico's van elektriciteit:
 - brand en explosie;
 - het vrijkomen van schadelijke stoffen;
 - vallen en stoten door schrikreacties en spiercontracties.

2.1.1 Directe risico's

Allereerst is er het 'aanraakgevaar'. Wanneer een persoon in contact komt met een elektrische spanning gaat er een elektrische stroom door het lichaam lopen. Spanningen tot 120 volt gelijkspanning en 50 volt wisselspanning worden algemeen als 'aanraakveilig' beschouwd en leiden niet tot letsel.² Stroom door een menselijk lichaam kan blijvende schade of zelfs overlijden bewerkstelligen. Bij stroomsterktes van tien tot twintig milliampère kan al spierverkramping optreden die hartproblemen of zelfs een hartstilstand tot gevolg kunnen hebben. De risico's bij verkeerd gebruik van elektriciteit hangen af van verschillende omstandigheden. Lichaamsgewicht, conditie en geslacht zijn van invloed, evenals of het om wisselstroom of gelijkstroom gaat, de tijdsduur van de schok, de route door het lichaam, klimaat (vocht geleidt beter) en de grootte van het aanrakingsoppervlak. Bij kortsluiting kunnen zogenoemde vlambogen ontstaan, waardoor het menselijk lichaam verbrandingen kan oplopen.³

Een ander verschijnsel dat in de praktijk voorkomt is oplading door statische elektriciteit. Statische elektrische oplading komt vooral voor bij bewegende, stromende vloeistoffen. Het ontstaat door wrijving van de vloeistof met de wand van een slang of buis waardoor de vloeistof stroomt. Statische oplading is niet zichtbaar, maar er wordt wel een elektrisch veld opgewekt met een spanningspotentiaal die erg groot kan worden. Er bestaat dan het risico op 'doorslag': de opgebouwde lading slaat over naar de direct geleidende omgeving. Dit gaat vaak gepaard met vonken.

Te sterke elektromagnetische velden kunnen biologische effecten of zelfs gezondheidseffecten veroorzaken. Elektromagnetische velden met een frequentie tussen 0 tot 10 megahertz (hierbinnen valt de '50 hertz' van de energievoorziening), kunnen elektrische velden en stromen in het lichaam opwekken, die zenuwcellen of spieren kunnen prikkelen. Als de velden en stromen in het lichaam sterk genoeg zijn, kan dat leiden tot tintelingen, pijn, spiersamentrekkingen of tot het zien van lichtflitsen. Bij heel hoge veldsterkten kan de hartfunctie verstoord worden. Langdurige blootstelling aan magnetische velden wordt in verband gebracht met ziektes als kinderleukemie, ALS en kanker. Er is daarbij nooit een *causaal* verband aangetoond.⁴

² Zie NEN-EN 50110, par. 6.4.1.2.

³ Vlambogen kunnen ook ontstaan bij zonnepanelen. Door de aanwezigheid van gelijkspanning blijven de vlambogen bestaan. Zie bijvoorbeeld <https://youtu.be/S9a2oPCIMr0> en <https://youtu.be/Jtd8gThGo0M>.

⁴ Meer informatie over dit onderwerp is te vinden op de website van het Kennisplatform Elektromagnetische velden (<https://www.kennisplatform.nl/>). Het Kennisplatform wordt gecoördineerd vanuit het RIVM. DNV is één van de deelnemers aan dit platform.

Om mensen te beschermen tegen de effecten van sterke elektromagnetische velden gelden er limieten waaraan mensen mogen worden blootgesteld. Bij een sterkte onder deze limieten treden geen effecten op de zintuigen of gezondheidseffecten op. Voor elektrische velden is de limiet 5 kilovolt per meter, voor magnetische velden is de limiet 100 microtesla (bij 50 hertz).⁵ De velden van elektriciteitsinfrastructuur zoals hoogspanningslijnen, ondergrondse kabels en transformatorhuisjes blijft volgens het RIVM op voor het publiek toegankelijke plaatsen ruim onder deze limieten.

2.1.2 Indirecte risico's

Het gebruik van elektriciteit kan ook brand of explosies tot gevolg hebben, bijvoorbeeld als de zojuist genoemde doorslag plaatsvindt in een explosieve omgeving. Ook kunnen schadelijke stoffen vrijkomen, bijvoorbeeld door elektrolyse, of door deel(ontledings)producten bij een kortsluiting. Als de stroomsterkte door het lichaam niet direct schadelijk is, kan men toch van de 'schok' zo schrikken of door spiercontracties zo verkrampen, dat men bijvoorbeeld van een ladder of steiger valt. In deze gevallen is er sprake van secundaire ongevallen. Ook hierdoor kan ernstig letsel ontstaan, zoals botbreuken, wervelletsel en brandwonden.

In het bijzonder wordt hier gewezen op het verschijnsel van *electric shock drowning* (ESD), vertaald als elektrische schokverdrinking. ESD is ook een indirect risico. ESD kan zich voordoen bij een persoon die zich in het water bevindt, zoals zwemmers, terwijl er een elektrische wisselstroom door zijn lichaam vloeit. Als de stroom sterk genoeg is kunnen spierverlammingen optreden, waardoor de persoon de controle over zijn lichaam verliest en daardoor kan verdrinken. Hogere stroomniveaus in het water kunnen leiden tot directe elektrocutie met de dood tot gevolg.

Vooral in de Verenigde Staten en Canada is veel aandacht voor ESD, in Nederland is dat minder.⁶ ESD is de verzamelnaam geworden voor alle slachtoffers van schokken in het water. Hoewel ESD vrijwel overal kan voorkomen waar elektriciteit wordt geleverd in de buurt van water, hebben de meeste sterfgevallen door elektrische schokverdrinking plaatsgevonden in jachthavens en bij dokken. Het typische slachtoffer van ESD is een kind dat in of rond een jachthaven of dok zwemt waar elektriciteit aanwezig is. De elektriciteit die in het water komt en ESD veroorzaakt, is afkomstig van de bedrading van de aanlegsteiger of jachthaven, of van boten die zijn aangesloten op de stroomvoorziening van de jachthaven of de aanlegsteiger. ESD kan zich ook voordoen nabij drijvende zonneparken, als deze niet veilig zijn aangelegd.

Om elektrische veiligheid te kunnen waarborgen, moeten de juiste voorzorgsmaatregelen worden genomen. Zo is het verplicht om goede werkafspraken te maken om de risico's te beheersen en de veiligheid te vergroten. Een voorbeeld van een werkafpraak is: "Elke elektrische opstelling dient tenminste zó te zijn uitgevoerd, dat willekeurige 'voorbijgangers' niet in aanraking kunnen komen met gevaarlijke spanningen." Voorzorgsmaatregelen worden vaak vastgelegd in normen. Vaak zijn normen het gevolg van wetgeving op het gebied van veiligheid. In par. 3.2 wordt ingegaan op wet- en regelgeving en normen.

2.2 Normen en wet- en regelgeving voor elektrische veiligheid

Om het veilig gebruik van elektrische installaties te waarborgen, is onder druk van overheden en industrie een uitgebreide set aan elektrotechnische normen (standaarden) uitgewerkt. Een norm is een *vrijwillige* afspraak tussen belanghebbende partijen over een product, dienst of proces. Normalisatie is het proces om te komen tot een norm. Dit proces is open, transparant en gericht op consensus. De afspraken worden vastgelegd in de vorm van termen en definities, functionele en prestatiegerichte eisen, bepalingsmethoden en praktische richtlijnen. Bij de totstandkoming van normen is *in het algemeen* een brede vertegenwoordiging van belanghebbenden aanwezig. Normen hebben daarom een groot draagvlak en autoriteit. Normen zijn echter geen wetten, maar *best practices*. Iedereen kan – op vrijwillige basis – hier zijn voordeel mee doen. In zakelijke overeenkomsten hebben normen een belangrijke functie. Ze bieden marktpartijen duidelijkheid over en vertrouwen in producten, diensten of organisaties en dagen de maatschappij uit te innoveren.⁷

⁵ Zie: Aanbeveling van de Europese Raad van 12 juli 1999 betreffende de beperking van blootstelling van de bevolking aan elektromagnetische velden van 0 Hz - 300 GHz (1999/519/EG).

⁶ Zie bijvoorbeeld <https://www.electricschockdrowning.org/>.

⁷ Deze omschrijving van 'normen' is afkomstig van NEN, het Nederlands normalisatie-instituut (zie www.nen.nl).

Op het gebied van elektrische veiligheid zijn in de loop van de tijd diverse normen ontwikkeld. NEN 1010 is een voorbeeld van zo'n norm. NEN 1010 kan toegepast worden bij het aanleggen van laagspanningsinstallaties (tot 1000 volt wisselspanning en 1500 volt gelijkspanning).⁸ Voor zonneparken is dat het gedeelte van de zonnepanelen tot aan de transformator. Een andere bekende norm is NEN 3140. NEN 3140 is de norm voor het veilig werken aan en met elektrotechnische laagspanningsinstallaties, bijvoorbeeld in woningen, gebouwen en bij infrastructuur. NEN 3140 kan toegepast worden op de bedrijfsvoering van elektrische installaties en apparatuur. De vergelijkbare norm voor het veilig werken aan elektrotechnische installaties boven genoemde spanningen is NEN 3840. Voor hoogspanningsinstallaties (boven 1000 volt wisselspanning en 1500 volt gelijkspanning) wordt elektrische veiligheid geborgd met NEN-EN-IEC 61936-1 NEN-EN 50522.

In wetgeving wordt zo nu en dan rechtstreeks naar normen verwezen. Zo verwijst de Woningwet (indirect) naar normen. De Woningwet geeft niet alleen bepalingen over volkshuisvesting en regels om de bouw van goede woningen te bevorderen, maar geeft ook bepalingen over het ruimere begrip 'bouwwerk'; het hoeft dus niet per se om een woning te gaan. Ook 'constructies van enige omvang' vallen hieronder. Artikel 1a van de Woningwet luidt: "De eigenaar van een bouwwerk, open erf of terrein of degene die uit anderen hoofde bevoegd is tot het daaraan treffen van voorzieningen draagt er zorg voor dat als gevolg van de staat van dat bouwwerk, open erf of terrein *geen gevaar voor de gezondheid of veiligheid ontstaat dan wel voortduurt.*" Voor de toepassing van deze wet wordt onder bouwwerk ook verstaan de daarvan deel uitmakende installaties, zoals elektrische installaties.

Het Bouwbesluit is een algemene maatregel van bestuur (AMvB) onder de Woningwet en geeft een verzameling bouwtechnische voorschriften waaraan alle bouwwerken in Nederland moeten voldoen. Artikel 6.8 van het Bouwbesluit bepaalt onder meer dat een voorziening voor elektriciteit moet voldoen aan NEN 1010 (bij lage spanning).

Ook in de Nederlandse arbeidsomstandighedenwetgeving wordt naar normen verwezen. De Arbeidsomstandighedenwet bevat in artikel 3 een zorgplicht voor de werkgever: "De werkgever zorgt voor de veiligheid en de gezondheid van de werknemers inzake alle met de arbeid verbonden aspecten (...)". De wet delegeert de uitwerking van enkele specifieke zaken naar onderliggende regelingen: het Arbeidsomstandighedenbesluit (een AMvB) en de Arbeidsomstandighedenregeling (een ministeriële regeling). Artikel 3.5 van het Arbeidsomstandighedenbesluit gaat over werkzaamheden aan of nabij een elektrische installatie. Het voldoen aan NEN 3140 (en NEN 3840) wordt beschouwd als een invulling van de wettelijke verplichtingen van dit artikel. Als aan de norm wordt voldaan, is op dit punt aan de wet voldaan.

2.3 CE-markering

Ten slotte wordt nog gewezen op de zogenoemde CE-markering. Veel producten die binnen de Europese Unie (EU) op de markt verschijnen, moeten een CE-markering hebben. De CE-markering geeft aan dat het product voldoet aan wettelijke eisen, bijvoorbeeld op het gebied van veiligheid. Fabrikanten moeten zelf vaststellen of een product aan de eisen voldoet. Ook moet de fabrikant zelf de CE-markering aanbrengen. In Nederland controleren verschillende instanties de producten waarvoor een CE-markering verplicht is.

Voor elektrische apparatuur en materialen die zijn ontworpen voor gebruik bij een wisselspanning tussen 50 en 1.000 volt en/of een gelijkspanning tussen 75 en 1.500 volt, geldt de CE-markering op grond van het Warenwetbesluit elektrisch materiaal (dit is één van de vele AMvB's die bij de Warenwet horen). Het gaat hier om het *beoogd* gebruik. Dat een individueel zonnepaneel soms een spanning genereert lager dan de hiergenoemde grenzen betekent niet dat dit Warenwetbesluit niet geldt.

Deze AMvB beoogt mensen te beschermen tegen gevaar van verwonding of andere schade die kan worden toegebracht door directe of indirecte aanraking van elektriciteit en tegen boogontladingen of straling. Voor veel elektrische apparatuur is de Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit (NVWA) de toezichthouder. Het Warenwetbesluit elektrisch materiaal is de Nederlandse implementatie van EU-richtlijn 2014/35/EU "betreffende de harmonisatie van de

⁸ De Nederlandse Praktijkrichtlijn NPR 5310 bevat nog een toelichting op de norm NEN 1010.

wetgevingen van de lidstaten inzake het op de markt aanbieden van elektrisch materiaal bestemd voor gebruik binnen bepaalde spanningsgrenzen”.

Voordat apparaten in de handel worden gebracht, dient op het apparaat (of op het gegevensplaatje) een CE-markering aangebracht te worden. Als dit vanwege de aard van het materiaal niet mogelijk of verantwoord is, mag de CE-markering aangebracht worden op de verpakking en in de begeleidende documenten. Apparaten met CE-markering zijn vrij verhandelbaar in de hele Europese Economische Ruimte (EER). Dit zijn alle EU-landen plus Liechtenstein, Noorwegen en IJsland. Nationale overheden mogen geen aanvullende eisen stellen. Als producten niet aan de Europese eisen voldoen, is CE-markering niet toegestaan en mogen de producten niet worden verhandeld in de EER.

3 REFERENTIEONTWERP DRIJVEND ZONNEPARK

Dit hoofdstuk beschrijft elektrische referentieontwerpen van een FPV-installatie. In de tekst is gebruik gemaakt van de figuren/tekeningen van het uiteindelijke FPV ontwerp zodat de uitleg toegankelijker is. Bij het maken van dit FPV referentieontwerp is rekening gehouden met het optimaliseren van de zwemwaterveiligheid door bepaalde elektrische keuzen te maken. Tussenvarianten worden niet afgebeeld.

Het FPV referentieontwerp wordt vervolgens gebruikt voor het bepalen van de elektrische veiligheid en het berekenen van de minimale afstand om ESD van een zwemmer in de nabijheid van de FPV-installatie te voorkomen.

3.1 Uitgangspunten algemeen en regelgeving

Voor een onderzoek voor Rijkswaterstaat heeft TNO na raadplegen van de NEN 1010 artikel 702 “Zwembaden en fonteynen” en specifiek artikel 702.11 /1/ geconcludeerd dat een FPV aan dit artikel zou moeten voldoen /5/. Na raadplegen van NEN 1010 artikel 702.410.3.101.1 /1/ door DNV concludeert DNV dat door de gestelde eisen aan de toegestane spanning, maximaal 12 Vac of 30 Vdc, in dit artikel een FPV onmogelijk is. De MPP-spanning en de openklemspanning van de meeste PV panelen is namelijk al hoger.

Om de juiste interpretatie van de NEN 1010 te hebben heeft DNV bij de NEN normcommissie TC-NEC 64 (commissie die de NEN 1010 samenstelt) gevraagd of een FPV-installatie zou moeten voldoen aan de NEN 1010. De commissie heeft daarop geantwoorde dat volgens NEN 1010 11.3.c /1/ norm niet van toepassing is omdat de FPV wordt beschouwd als een elektrische installatie die valt onder “elektrische installaties aan boord van schepen en van verplaatsbare en vaste eenheden te water, zoals offshore platforms”. De normen die behoren bij elektrische installaties aan boord van schepen en van verplaatsbare en vaste eenheden te water, zoals offshore platforms beschouwt DNV als te zwaar om toe te passen bij FPV-installaties.

Op dit moment is er nog geen specifieke norm voor de elektrische installatie van een FPV. Om toch veilige en betrouwbare referentieontwerpen te kunnen maken is in dit document gebruik gemaakt van de elektrotechnische principes en eisen die in de NEN 1010 zijn beschreven, echter niet gebruik makend van de eisen genoemd in artikel 702 “Zwembaden en fonteynen” /1/. Bij specifieke elektrische verschijnselen, bijvoorbeeld zwerfstrombeperking, is gewerkt volgens “*good engineering practice*” en is gebruik gemaakt van de beproefde kennis/technieken, bijvoorbeeld de maatregelen die ook ProRail gebruikt om zwerkstromen zoveel mogelijk te beperken. Voor hoogspanningsinstallaties (boven 1000 volt wisselspanning en 1500 volt gelijkspanning) wordt elektrische veiligheid geborgd met NEN-EN-IEC 61936-1 NEN-EN 50522.

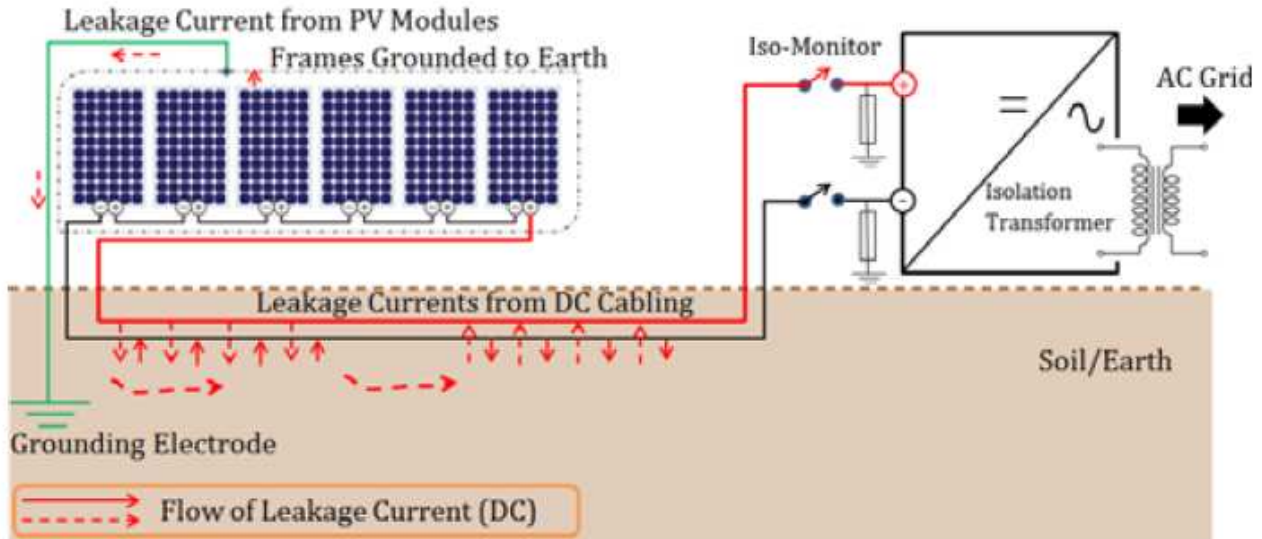
3.2 Het elektrisch systeem

Om een zo groot mogelijke elektrische veiligheid op een FPV-installatie te kunnen realiseren is de installatie integraal bekeken. De installatie is daarom als één elektrisch geheel benaderd. Mocht de bouw van een FPV-installatie over meerdere partijen worden verdeeld dan moet de gehele installatie onderling afgestemd worden zodat het samen één elektrisch veilig geheel vormt.

3.3 Elektrisch gedrag installatie en componenten

3.3.1 Lekstromen

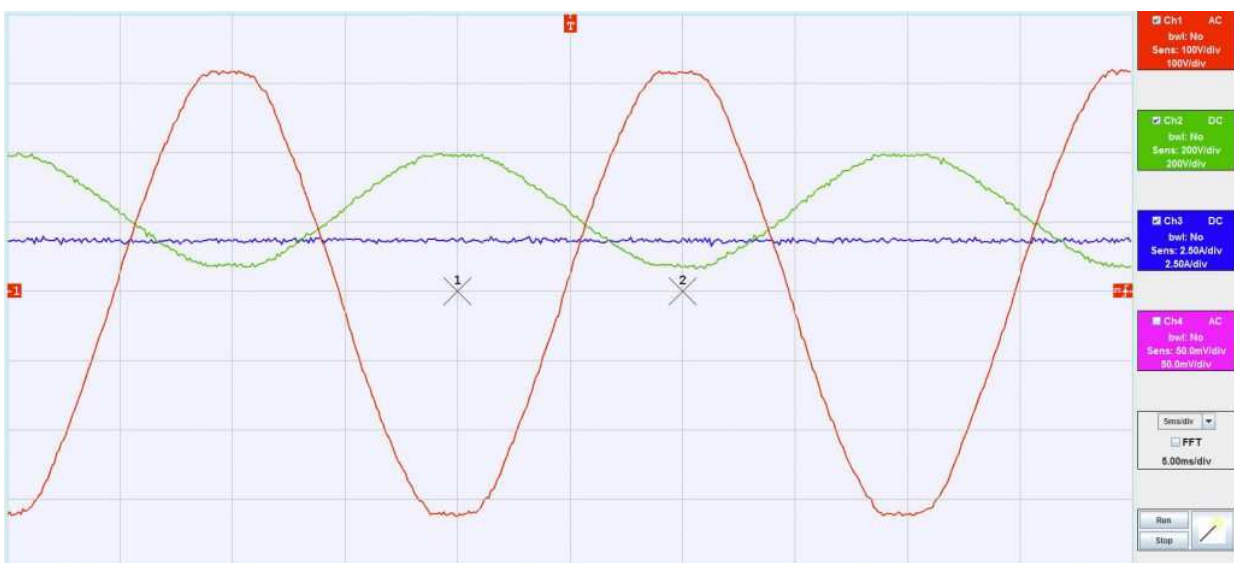
De weerstand van AC en DC kabelisolatie is zeer hoog in de richting van tientallen mega Ohms. Maar deze is niet oneindig hoog. Hierdoor zal door de kabelisolatie een lekstroom gaan lopen, zie onderstaande Figuur 1 /3/.



Figuur 1 PV-installatie geïsoleerd van aarde aangesloten via een omvormer op een IT systeem.

De spanning tussen de plus en min pool aan de DC zijde van de omvormer is een gelijkspanning. Doordat de gelijkspanning ook over de kabelisolatie staat ontstaat hier een DC lekstroom naar de omgeving, zie rode pijlen in Figuur 1.

De DC stringspanning heeft ten opzichte van aarde ook een wisselspanningscomponent. Deze wisselspanningscomponent ontstaat door toepassing van een transformatorloze 3 fasen omvormer en de zogenaamde rimpelspanning en bedraagt 300 Hz. De wisselspanning die over de kabelisolatie staat, veroorzaakt een AC lekstroom. Hogere harmonische spanningen, met de schakelfrequentie van de omvormer, zijn gesuperponeerd op (toegevoegd aan) deze wisselspanning.



Figuur 2 Common mode spanning van een transformatorloze omvormer.

In de volgende punten worden de grafieken in Figuur 2 verder toegelicht:

1. Rode lijn: Netspanning. RMS spanning van 230 V en een topwaarde van ongeveer 325 Volt, schaal 100 V/div
2. Groene lijn: DC spanning tussen PLUS en PE. Om dat gemeten is op een 1 fase PV omvormer heeft deze spanning een frequentie van 50 Hz, boven de nul lijn. Dit zelfde geldt voor de spanning tussen MIN en PE, deze bevindt zich echter onder de nullijn. Tussen de PLUS en de MIN staat een gelijkspanning. Ten opzichte van aarde staat er een wisselspanning component op de zonnepanelen, schaal 200 V/div.
3. Blauwe lijn: de DC stroom. Schaal: 2,5 A/div.

3.3.2 Effecten lekstroom

Een AC lekstroom heeft op de aardelektroden in de installatie geen negatief effect omdat de ene helft van de periode de elektronen van de aardelektrode af bewegen en de volgende halve periode naar de aardelektrode. Hierdoor corrodeert de aardelektrode niet.

De DC lekstroom kent één stroomrichting. Op plaatsen waar de gelijkstroom uit de geleider (aardelektrode) treedt naar aarde of water ontstaat een chemische reactie /3/. Als een ijzeren aardelektrode wordt gebruikt dan ontstaat de volgende chemische reactie: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$. Bij deze reactie lost het ijzer op en zal de aardelektrode uiteindelijk verdwijnen.

Doordat de DC zwerfstromen deze chemische reactie veroorzaakt, met tot gevolg dat de aardelektrode kan verdwijnen, verandert ook het elektrische gedrag/werking van het aardsysteem van de FPV-installatie. Voor de elektrische veiligheid moet de aardelektrode aanwezig blijven.

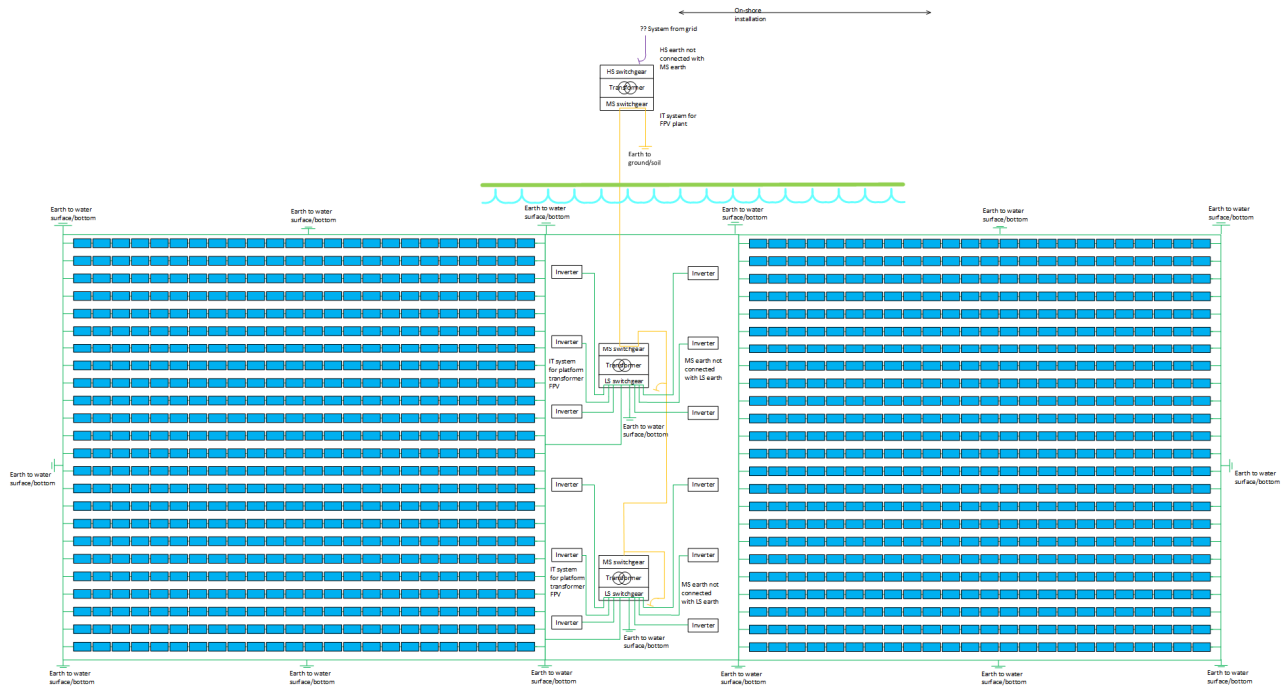
Indien de verankering van het platform ook van een elektrische geleidend materiaal is, kan deze ook functioneren als aardelektrode en dus aangetast worden door zwerfstromen. Voor de ankerlijnen dient onderzocht te worden of het mogelijk is om kunststof lijnen toe te passen.

3.3.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Oplossen/verdwijnen aardelektroden	<ul style="list-style-type: none"> • Een ontwerp maken waarbij de zwerfstromen zo minimaal mogelijk is. Kies zoveel mogelijk IT-stelsels en onderbreek daar waar mogelijk de aardcircuits. Door het groepsmatig aarden van stelsels, TT-aardingsmethode, geeft de extra aardweerstand een lagere zwerfstromen (In DC tractie wordt dit type van aarding ook gebruikt, bijvoorbeeld 1500 Vdc tractie van ProRail /4/, RET en GVB 750 Vdc metronet). • De materiaalkeuze aardelektrode zodanig kiezen dat de elektrode minimaal oplost/corrodeert. Bijvoorbeeld een metaal, denk aan koper of brons (scheepsschroef) voor de elektrode en een extra bescherming door het plaatsen van een zinken opofferings elektrode. • Jaarlijks, bij voorkeur in de lente, bij het onderhoud alle aardelektroden inspecteren en indien nodig vervangen.
2.	Oplossen metalen verankering (ketting/staalkabel)	<ul style="list-style-type: none"> • Om aantasting door zwerfstromen te voorkomen wordt gekozen voor synthetische kunststof (bijvoorbeeld: Dyneema of Twaron) lijnen voor de verankering. Dit is een kunststof die bij gelijk doorsnede circa 5 x sterker is dan staal en is ongevoelig voor UV en bestand tegen zeewater.

3.4 Principelocaties aardingen

In Figuur 3 geeft de principelocaties aan waar de aarding en aardelektroden worden aangebracht en waar de aardcircuits zijn onderbroken om zwerfstromen te voorkomen. Dit geldt voor variant A en de daarvan afgeleide varianten B, C en D. Voor variant E is de aarding van de FPV-installatie wel gekoppeld met het aardnet van de MS installatie op het land. De figuur is ook vergroot weergegeven in Appendix B.



Figuur 3 Locaties van aardpunten en onderbrekingen in de aardcircuits.

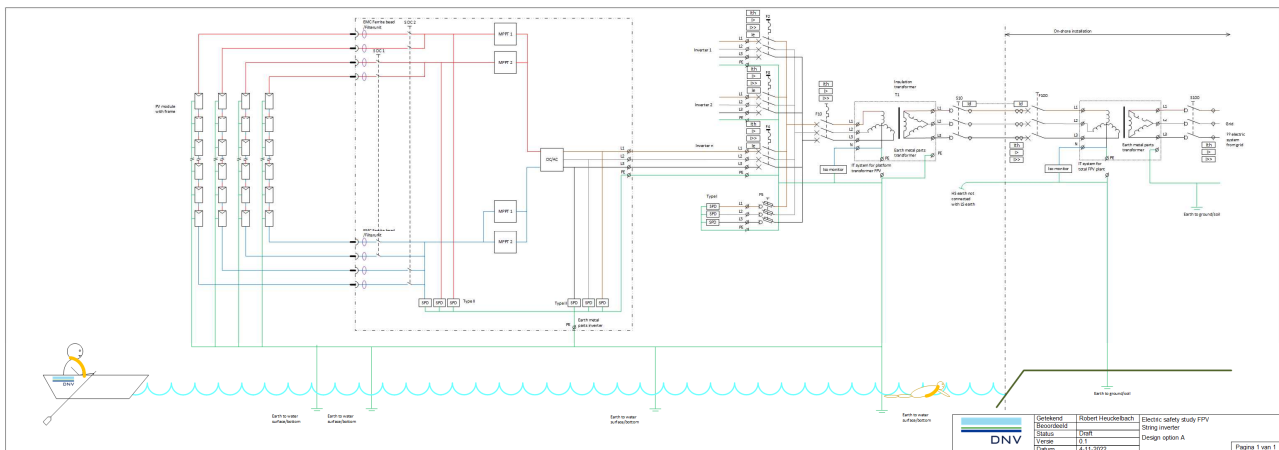
Door om de PV modules het aardingsnet aan te brengen (ringnet) blijft een eventuele aardfoutstroom het grootste deel van de stroom binnen het aardnet (heeft de laagste weerstand). Buiten het ringnet loopt rond de aardelektrodes een klein deel van de stroom. Door de PV omvormers, de LS-kabels en verdelers inclusief de transformatoren tussen de PV modules en omringd door een aardnet te situeren zal een aardfoutstroom via het aardnet naar de bron (de MS/LS transformator) terug gaan en minimaal richting de omgeving van de FPV-installatie gaan.

De hoogspanningskabelverbinding tussen de FPV-installatie en het onderstation op de wal is niet omringd door een aardnet. Daarom moet deze hoogspanningskabelverbinding voorzien zijn van een aardscherm zodat bij een eventuele aardfout een laag ohmig pad terug naar de bron (de MS/HS transformator) ontstaat en de foutstroom in de kabel gaat lopen in plaats van het water.

3.5 Ontwerp FPV-installatie variant A, stringomvormers

De varianten bevatten alle gangbare ontwerpopties voor drijvende zonneparken, dus afwijkende ontwerpen zullen altijd gebruik maken van de opties in de varianten waardoor altijd voldaan kan worden aan de ontwerp-eisen die uit de varianten volgen.

Voor het onderzoek naar de elektrische zwemwaterveiligheid in de nabijheid van een FPV is in onderstaande Figuur 4 variant A afgebeeld. In de daarop volgende sub-paragrafen is het ontwerp verder beschreven.



Figuur 4 FPV-installatie variant A.

Tijdens de uitwerking van variant A zijn enkele extra varianten ontstaan die meegenomen worden in dit onderzoek, zie hiervoor paragrafen 3.6, 3.6, 3.7 en 3.8.

3.5.1 Ontwerp PV generator

3.5.1.1 Omschrijving ontwerp

Een PV module bestaat uit een glasplaat waarachter de PV cellen zijn aangebracht. Met behulp van een kunststof folie zijn de PV cellen gefixeerd op de glasplaat. Via één of twee junction boxen kan de PV module elektrisch worden aangesloten. Ter versteviging is aan de buitenrand van de glasplaat is een aluminium frame aangebracht voor de montage op een onderconstructie.

De PV modules worden per module op één drijver of meerdere modules op een grotere drijver gemonteerd. Ter voorkoming van aanraakspanningen tussen twee of meerdere metalen gestellen moeten alle metalen gestellen met elkaar worden vereffend conform NEN 1010 712.54. De vereffening moet worden gekoppeld met het aardsysteem zodat te hoge aanraakspanningen worden voorkomen.

Met potentiaalvereffening en aarding wordt de circuitimpedantie verlaagd. Dit is positief voor de aanraakveiligheid echter het werkt ook een toename van AC en DC zwerfstrom in de hand.

Om het onderhoud te beperken worden in het ontwerp geen optimizers/micro omvormers per paneel gebruikt. Dit in verband met de extra connectoren (connectoren hebben een grote faalkans) en elektronica (vochtindringing) die op een slecht toegankelijke locatie op het water worden gemonteerd.

3.5.1.2 Afwegingen

Indien gekozen wordt voor PV modules met frame dient men in de rest van de installatie rekening te houden met een grotere AC en DC lekstroom. Om de lekstroom te verlagen kan gekozen worden voor glas-glas PV modules. Deze modules hebben geen geleidende rand die moet worden vereffend. De potentiaalvereffeningsleiding kan dan vervallen.

3.5.1.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Productie van AC en DC lekstroom	<ul style="list-style-type: none"> Indien veilig, het vergroten van de circuitimpedantie van het potentiaal vereffening en aarding. Kies voor de elektrische installatie een IT-stelsel. Hierbij is het transformatorsterpunt niet gekoppeld met aarde (zwerfstroomcircuit is hiermee onderbroken) en daarmee ook niet met de metalen gestellen. Metalen gestellen moeten wel worden geaarde en vereffend, NEN 1010 411.6.2.

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
		<p>Om aardfouten op te sporen dient isolatiebewaking te worden aangebracht, NEN 1010 411.6.3.</p> <ul style="list-style-type: none"> Indien glas-glas modules worden gebruikt, hoeven geen potentiaalvereffeningsleidingen te worden aangelegd. Nagegaan moet worden of glas-glas modules mechanisch sterk genoeg zijn om 25 jaar lang mechanische belasting van de golven en wind zonder te falen te kunnen weerstaan.
2.	Connectoren, binnendringend water	<ul style="list-style-type: none"> Om falen van connectoren te voorkomen dienen de connectoren boven water gefixeerd te worden. De connector mag door de beweging van de FPV geen mechanische belasting te verduren krijgen. Door op de juiste plekken de kabels te fixeren ontstaat trekcontlasting op de connector.
3.	Connectoren, slecht elektrisch contact	<ul style="list-style-type: none"> De connectoren dienen met zorg te worden aangebracht. Er mogen geen connectoren van verschillende types te worden "gekoppeld", NEN 1010 712.526.1.
4.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten, "<i>keep it simple</i>". Daarom is gekozen om geen optimizers te gebruiken, dit geeft ook een reductie van het aantal connectoren.
5.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn als de installatie op het water ligt.

3.5.1.4 Gemaakte keuze

Tijdens het opstellen van dit referentieontwerp is weinig informatie bekend hoe sterk de glas-glas modules zijn en bestand tegen langdurige mechanische belasting door wind en golven. Daarom wordt vooralsnog uitgegaan in dit ontwerp van een PV module met een aluminium frame dat vereffend moet worden.

Ook worden geen optimizers/micro omvormers per PV module gebruikt om het aantal componenten dat kan falen wordt beperkt.

3.5.2 DC kabels

3.5.2.1 Omschrijving ontwerp

De DC kabels zijn de kabels de verbindingen tussen de PV modules en de omvormer. Kabels moeten voldoen aan NEN 1010 712.521.101. Aanvullend op de NEN 1010 zal rekening gehouden moeten worden dat de hele FPV constructie ten opzichte van elkaar kan bewegen. De DC kabels moeten daarom ook voldoende flexibel zijn om de bewegingen te kunnen volgen. De kabels dienen voldoende te worden ondersteund.

Om krachten op de connectoren van de omvormers te voorkomen dienen de DC kabels nabij de omvormer te zijn voorzien van een deugdelijke trekcontlasting.

Ter voorkoming van overspanningsschade van de PV modules en de omvormer moeten de plus en de min stringkabel bij elkaar gelegd, NEN 1010 712.521.102, te worden om het oppervlak, ook bekend als de DC lus, zo klein mogelijk te houden. Tevens dient de vereffeningseleider/aarddraad parallel met de DC string bekabeling te lopen.

Om zoveel mogelijk PV modules per omvormer te kunnen aansluiten en een groot mogelijke omvormer te kunnen gebruiken wordt uitgegaan van maximaal 1500 Vdc (bij -10 °C en 1000 W/m² instraling). De normale werkspanning van de string ligt tijdens bedrijf rond de 1200 Vdc.

Bij gebruik van een transformatorloze omvormer staat er op een DC string een *common mode* spanning ten opzichte van aarde. Door deze spanning in combinatie met de lus wordt een elektrisch veld veroorzaakt en werkt de PV-installatie als “zender”. Dit elektrische veld kan EMC problemen in de omgeving veroorzaken mogelijk het marifoonverkeer beïnvloeden en dient daarom te worden voorkomen. Om dit te voorkomen dient de plus en min kabel van elke string bij elkaar gehouden te worden.

3.5.2.2 Afwegingen

Als DC kabels wordt in dit ontwerp de veel gebruikte één aderige kabel met een niet metalen buitenmantel gebruikt. In verband met het aantal parallel lopende kabels, de spanningsdaling en de mechanische sterkte wordt een 6 mm² koperen kabel gebruikt.

3.5.2.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Overspanning	<ul style="list-style-type: none"> De plus en min kabel van elke string bij elkaar leggen in hetzelfde kabeltracé. Potentiaalvereffeningsdraad of aarddraad parallel aan de string laten mee lopen.
2.	EMC emissie	<ul style="list-style-type: none"> De plus en min kabel van elke string bij elkaar leggen in hetzelfde kabeltracé. Potentiaalvereffeningsdraad of aarddraad parallel aan de string laten mee lopen.
3.	Slechte verbinding	<ul style="list-style-type: none"> Om falen door een slechte verbindingen te voorkomen worden alleen kabels uit één stuk toegepast. Er mogen geen connectoren worden gebruikt om de kabel te verlengen.

3.5.2.4 Gemaakte keuze

De plus en min string kabels bij elkaar houden. Stringspanning 1200 Vdc.

Omdat in de praktijk het DC lus oppervlak niet nul is wordt in de berekeningen hiervoor een oppervlak van 2 m² per string aangehouden.

3.5.3 Omvormer

3.5.3.1 Omschrijving ontwerp

Met een omvormer wordt de DC stringspanning omgezet in een 50 Hz wisselspanning. Voor dit referentieontwerp wordt hiervoor een transformatorloze omvormer gekozen omdat deze het hoogste rendement heeft, circa 98-99%.

Als AC spanning is 800 Vac gekozen zodat de AC kabelverliezen lager zullen zijn en tevens de AC kabeldoorsnede beperkt kan worden. Doordat de AC kabel dunner is, is deze flexibeler en kan de AC kabel beter de bewegingen van de drijvende FPV-installatie volgen.

Het metalen gestel van de omvormer moet zijn geaard/vereffend.

Ter reductie/voorkoming van de aardfoutstroom is gekozen voor een IT stelsel in het laagspanningsnet. Omdat dit een zwevend elektrisch stelsel is er kan er pas bij de tweede isolatiefout een fout stroom gaan lopen. De omvormer moet geschikt zijn voor op een IT stelsel te kunnen aansluiten. De benodigde isolatiemonitoring (IMD) in de omvormer dient

hoogohmig te zijn, uitgevoerd als een spanningsmeting, om een mogelijk zwerfstroom pad en een eerste fout in een IT stelsel te voorkomen.

Om de omvormer te beschermen tegen overspanning aan de DC zijde zijn de DC ingangen beschermd met een overspanningsbeveiliging, SPD type II. Om te voorkomen dat de omvormer als zender gaat functioneren dienen de uitgangen te zijn voorzien van een EMI filter, ferrietkraal om de DC kabels.

Om de omvormer te beschermen tegen een overspanning op de AC zijde is de AC ingang beschermd met een overspanningsbeveiliging, SPD type II. Om EMC problemen in het AC net te voorkomen dient de omvormer te zijn voorzien van een EMI filter.

Indien mogelijk wordt de omvormer aangesloten op een 800 V 3 fasen net zonder nul.

3.5.3.2 Afwegingen

Doordat de PV modules bijna geen extra kortsluitstroom kunnen produceren werkt de overstroom/kortsluitbeveiliging niet goed. Alleen als er meer dan 2 strings parallel staan kan de beveiliging afschakelen op een overbelasting/kortsluitstroom mits er voldoende zoninstraling is.

In dit referentieontwerp komen twee omvormers in aanmerking, te weten een stringomvormer en een centrale omvormer. Bij de stringomvormer is het DC kortsluitvermogen kleiner en is het eenvoudiger om een deel van de installatie af te schakelen om veilig(er) aan de installatie te kunnen werken. Ook is een eventuele aardfoutstroom kleiner door het kleinere aantal PV modules.

Een centrale omvormer heeft op de DC zijde een veel groter kortsluitvermogen wat bij een eventuele kortsluiting meer schade oplevert.

Om het kortsluitvermogen te beperken is in het referentieontwerp gekozen voor de stringomvormer.

3.5.3.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten, "keep it simple". Daarom is gekozen om geen optimizers/micro omvormers per PV module te gebruiken, dit geeft ook een reductie van het aantal connectoren.
2.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn als de installatie op het water ligt.
3.	Grote DC kortsluitstroom	<ul style="list-style-type: none"> Om te voorkomen dat een te grote DC kortsluitstroom ontstaat zal de PV generator, en daarmee het aantal PV modules, klein moeten worden gehouden. Door gebruik te maken van string omvormers wordt het DC kortsluitvermogen beperkt.

3.5.3.4 Gemaakte keuze

De omvormer is van het transformatorloze type. Er wordt niet voor optimizers/micro omvormers per PV module gekozen om het aantal componenten dat kan falen te beperken. Ook de bereikbaarheid van de optimizers/micro omvormers onder de PV modules op de drijvende constructie voor reparatie levert extra werk op.

Om het DC kortsluitvermogen beperkt te houden en installatie makkelijker in delen af te kunnen schakelen voor onderhoud wordt gekozen voor stringomvormers.

De omvormer wordt aangesloten op een 800 Vac netwerk volgens een IT-systeem.

Als tweede variant wordt de centrale omvormer met DC combiner boxen beschouwd.

3.5.4 AC kabels op FPV-installatie

3.5.4.1 Omschrijving ontwerp

De AC kabel is de verbinding tussen de omvormer en het transformator station LS/MS. Deze kabel is bij voorkeur een 3 fasen kabel zonder nul. Deze kabel heeft 3 fasen en een PE geleider. Bij voorkeur is de kabel voorzien van een aardscherm om EMI te voorkomen. Indien de doorsnede van de aardschermen voldoende elektrisch geleidend is, dan kan de PE geleider vervallen. Om de bewegingen van de FPV constructie kunnen volgen dient de AC kabel zeer flexibel te zijn.

Bij aansluitingen op componenten en bij bewegende overgangen dienen duurzame en sterke trektoelastingen te zijn aangebracht om te voorkomen dat de kabel wordt losgetrokken.

3.5.4.2 Afwegingen

In verband met de bewegingen van de constructie en het aanwezige water en UV licht dient gekozen te worden voor een daarvoor geschikte maritieme kabel.

3.5.4.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Kabelbreuk	<ul style="list-style-type: none"> Kabel moet extra flexibel zijn
2.	Isolatieschade	<ul style="list-style-type: none"> Het isolatiemateriaal is UV bestendig en geschikt voor een maritieme toepassingen
3.	Slechte verbinding	<ul style="list-style-type: none"> Om falen door een slechte verbindingen te voorkomen worden alleen kabels uit één stuk toegepast.

3.5.4.4 Gemaakte keuze

Flexibele maritieme kabel geschikt voor 800 V zonder nul en met aardscherm.

3.5.5 Transformatorstation LS / MS

3.5.5.1 Omschrijving ontwerp

Het LS/MS transformatorstation is geplaatst op een drijvende ponton.

In het LS/MS transformatorstation is een laagspanningsverdeler, een transformator en een middenspanningsverdeler aangebracht.

De omvormers zijn op de eindgroepen van de laagspanningsverdeler aangesloten. De eindgroepen zijn beveiligd met vermogensschakelaars voorzien van overbelasting-, kortsluit- en aardlekbeveiliging. Ter voorkoming van schade door een overspanning afkomstig uit het hoogspanningsnet is één eindgroep voorzien van overspanningsafleiders type I. De laagspanningsverdeler is via een vermogensschakelaar aangesloten op de transformator.

Het elektrisch stelsel van het laagspanningsnet is een IT stelsel. Conform NEN 1010 411.6.3.1 is een isolatiebewaking aanwezig die na de eerste fout een optische en akoestische signalering geeft. Deze foutmelding wordt gemeld aan het onderhoudsmanagement om te waarschuwen dat de installatie defect is en gerepareerd moet worden. Bij de tweede fout moet de beveiliging de installatie afschakelen.

De transformator zorgt voor een galvanische scheiding tussen de laag- en de middenspanning.

De metalen gestellen zijn met het aarding en potentiaalvereffening met de FPV-installatie verbonden.

Het aardscherm van de binnenkomende middenspanningskabel is niet verbonden met de aarding en potentiaalvereffening van de FPV-installatie. Door deze onderbreking is het zwerfstroomp pad via de kabelmantel naar de wal onderbroken. Indien er een zwerfstroom loopt dan loopt deze door het water en de grond naar de transformator.

Op het inkomende veld van de middenspanningsverdeler is de binnenkomende kabel vanaf de wal aangesloten. De binnenkomende kabel is met een differentiaalbeveiliging beveiligd tegen aardfouten.

Op het afgaande veld van de middenspanningsverdeler is de kabel naar de LS/MS transformator aangesloten. Dit veld is met een vermogensschakelaar beveiligd tegen overbelasting en kortsluiting. De vermogensschakelaar wordt ook gebruikt om de transformator af te schakelen en te scheiden voor (elektrotechnische) werkzaamheden.

3.5.5.2 Afwegingen

Om een zo klein mogelijk energieverlies te realiseren wordt een olie-gekoelde transformator gebruikt. Om milieuschade in geval van calamiteiten te beperken wordt de transformator gevuld met biologisch afbreekbare olie.

3.5.5.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik zo min mogelijk componenten, "keep it simple". • Gebruik indien mogelijk een smeltveiligheid in plaats van vermogensschakelaar. Een smeltveiligheid is minder onderhoudsgevoelig.
2.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn als de installatie op het water ligt.
3.	Zwerfstromen	<ul style="list-style-type: none"> • Door gebruik te maken van een IT stelsel is er geen retourcircuit voor de zwerfstroom via het sterpunt van de transformator. • Door het aardscherm van de middenspanningskabel niet te verbinden met het aardsysteem van het transformatorstation is het retourcircuit via de kabelmantel voor de zwerfstroom vanaf de landzijde onderbroken. Indien er een zwerfstroom loopt, dan loopt deze door het water en de grond naar de transformator, dit circuit is hoog Ohmiger waardoor de zwerfstroom wordt beperkt. De aarding van het aardscherm van de middenspanningskabel is aan de landzijde verbonden met het aardsysteem van het station op land.
4.	Milieuverontreiniging door olie	<ul style="list-style-type: none"> • Om milieuschade te beperken wordt in de transformator gebruik gemaakt van biologisch afbreekbare olie.
5.	Aanraakspanningen	<ul style="list-style-type: none"> • Door een IT stelsel te kiezen is er geen aanraakspanning aanwezig. Pas na de eerste fout is er een aanraakspanningsrisico.
6.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen laagspanning	<ul style="list-style-type: none"> • De laagspanningseindgroepen worden met vermogensschakelaars beveiligd. De laagspanningsverdeler wordt beveiligd met een laagspanningsvermogensschakelaar.
7.	Aardfoutbeveiliging	<ul style="list-style-type: none"> • De vermogensschakelaars van de eindgroepen zijn voorzien van aardlekbeveiliging (differentiaalbeveiliging) om na het ontstaan van een eerste aardfout de installatie snel te kunnen afschakelen wanneer een

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
		tweede aardfout ontstaat (door het falen van de isolatie gaat IT stelsel functioneren als een TN stelsel).
8.	Isolatiefout laagspanning	<ul style="list-style-type: none"> Met een isolatiebewaking wordt de isolatietoestand van de installatie bewaakt. Daalt de isolatieweerstand onder een ingestelde detectiewaarde dan wordt een voor alarm afgegeven. Daalt de isolatieweerstand nog verder dan wordt de laagspanningsinstallatie afgeschakeld.
9.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen middenspanning	<ul style="list-style-type: none"> De transformator wordt met een vermogensschakelaar beveiligd tegen overbelasting en kortsluiting.
10.	Isolatiefout middenspanningskabel	<ul style="list-style-type: none"> Met een differentiaalbeveiliging over de middenspanningskabel is de kabel beveiligd tegen aardfouten. Hiermee kan de fout snel worden gedetecteerd en afgeschakeld wat de elektrische veiligheid op en in het water ten goede komt.

3.5.5.4 Gemaakte keuze

Als nominale spanning voor de laagspanning is 800 V gekozen. Om het vermogen per transformatorstation te kunnen vergroten is gekozen voor een transformator met twee galvanisch gescheiden wikkelingen, schakeling: Dynyn. De sterpunten van beiden secundaire laagspanningswikkelingen worden niet geaard, zodat een IT stelsel ontstaat.

Als nominale spanning voor de middenspanning in dit referentieontwerp is 33 kV gekozen.

Voor andere ontwerpen kan voor een distributiespanning van 10 kV worden gekozen als er alleen een 10 kV distributienet aanwezig is.

3.5.6 AC MS kabel naar de wal

3.5.6.1 Omschrijving ontwerp

De middenspanningskabel vormt de verbinding tussen het LS/MS transformatorstation en het transformatorstation MS/HS op de wal. Afhankelijk van de configuratie kunnen meerdere LS/MS transformator stations op één kabel zijn aangesloten. Deze kabel is bij voorkeur een 3 fasen kabel zonder nul. Deze kabel heeft 3 geleiders en een PE scherm. Om de bewegingen van de FPV constructie kunnen volgen dient de middenspanningskabel zeer flexibel te zijn.

Bij aansluitingen op componenten en bij bewegende overgangen dienen duurzame en sterke trekontlastingen te zijn aangebracht om te voorkomen dat de kabel wordt losgetrokken.

Om het zwerfstromen tussen het drijvende transformatorstation en de wal te onderbreken is het aardscherm van de middenspanningskabel naar de wal onderbroken. Deze onderbreking is aangebracht op het drijvende transformator station. Het aardscherm van het middenspanningskabel is aan de landzijde verbonden met het aardsysteem van het MS/HS station.

Om een snelle afschakeling bij aardfouten te realiseren wordt een differentiaalbeveiliging over de kabel aangebracht.

3.5.6.2 Afwegingen

In verband met de bewegingen van de constructie en het aanwezige water en UV licht dient gekozen te worden voor een daarvoor geschikte marine kabel.

3.5.6.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
4.	Kabelbreuk	<ul style="list-style-type: none"> Kabel met extra flexibel zijn
5.	Isolatie schade	<ul style="list-style-type: none"> Het isolatiemateriaal is UV bestendig en geschikt voor een maritieme toepassingen
6.	Slechte verbinding	<ul style="list-style-type: none"> Om falen door een slechte verbindingen te voorkomen worden alleen kabels uit één stuk toegepast.

3.5.6.4 Gemaakte keuze

Flexibele maritieme kabel geschikt voor 33 kV zonder nul en met aardscherm. Gedacht wordt aan een kabel met voor een nominale spanning van 36 kV.

3.5.7 Transformatorstation MS/HS

3.5.7.1 Omschrijving ontwerp

Het MS/HS transformator station is op land gebouwd.

In het MS/HS transformatorstation is een middenspanningsverdeler, een transformator en een hoogspanningsverdeler aangebracht.

De LS/MS transformator stations van de FPV zijn op de middenspanningsverdeler van het walstation aangesloten. De velden zijn beveiligd met vermogensschakelaars. De middenspanningsverdeler is via een vermogensschakelaar aangesloten op de transformator.

Het elektrisch stelsel van het laagspanningsnet is een IT stelsel. Om isolatiefouten te detecteren is isolatiebewaking aanwezig die na de eerste fout een optische en akoestische signalering geeft. Deze foutmelding wordt gemeld aan het onderhoudsmanagement om te waarschuwen dat de installatie defect is en gerepareerd moet worden. Bij de tweede fout moet de beveiliging de installatie afschakelen.

De transformator zorgt voor een galvanische scheiding tussen de midden- en de hoogspanning.

De metalen gestellen zijn met het aarding en potentiaalvereffening van het MS/HS station verbonden.

Doordat de aardschermen van MS kabels naar de LS/MS stations op het water zijn onderbroken, zijn ook de zwerfstrompaden onderbroken.

3.5.7.2 Afwegingen

Om een zo klein mogelijke energieverlies te realiseren wordt een olie-gekoelde transformator gebruikt.

3.5.7.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten, "keep it simple".
2.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn.
3.	Zwerfstromen	<ul style="list-style-type: none"> Door gebruik te maken van een IT stelsel is er geen retourcircuit voor de zwerfstrom via het sterpunt van de transformator.

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
		<ul style="list-style-type: none"> Door het aardscherm van de middenspanningskabel niet te verbinden met het aardsysteem van het LS/MS transformator station is het retourcircuit voor de zwerfstroom vanaf de landzijde onderbroken. De aarding van het aardscherm van de middenspanningskabel is aan de landzijde verbonden met het aardsysteem van het MS/HS station.
4.	Isolatiefout middenspanningskabel	<ul style="list-style-type: none"> Met een differentiaalbeveiliging over de middenspanningskabel is de kabel beveiligd tegen aardfouten. Hiermee kan de fout snel worden gedetecteerd en afgeschakeld wat de elektrische veiligheid op en in het water ten goede komt.
5.	Aanraakspanningen	<ul style="list-style-type: none"> Door een IT stelsel te kiezen is er geen aanraakspanning aanwezig. Pas na de eerste fout is er een aanraakspanningsrisico.
6.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen laagspanning	<ul style="list-style-type: none"> De MS velden worden met vermogensschakelaars beveiligd.
7.	Isolatiefout middenspanning	<ul style="list-style-type: none"> Met een isolatiebewaking wordt de isolatietoestand van de MS installatie bewaakt. Daalt de isolatieweerstand onder een ingestelde detectiewaarde dan wordt een voor alarm afgegeven. Daalt de isolatieweerstand nog verder dan wordt de MS installatie afgeschakeld.
8.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen middenspanning	<ul style="list-style-type: none"> De transformator wordt met een vermogensschakelaar beveiligd tegen overbelasting en kortsluiting.

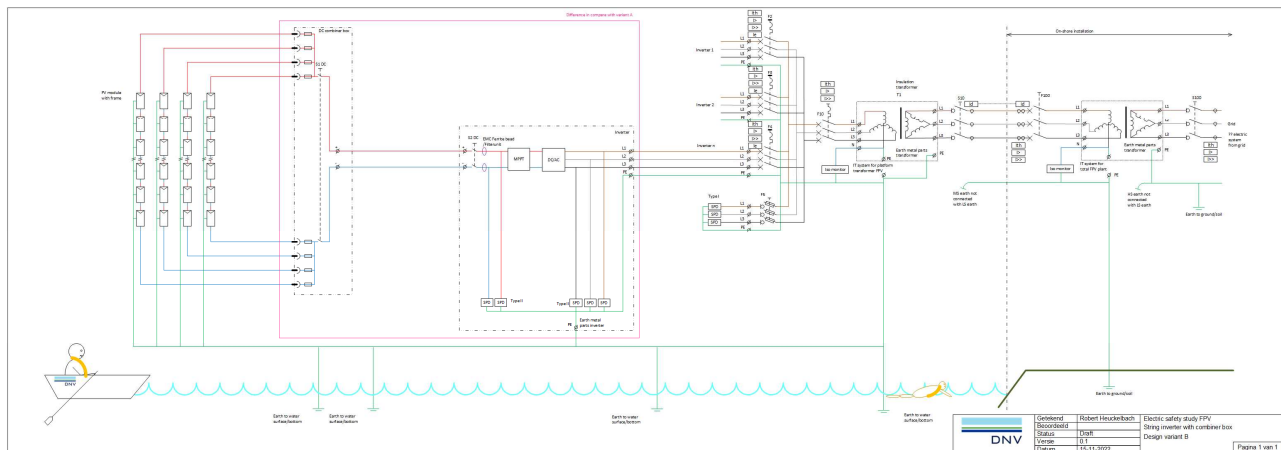
3.5.7.4 Gemaakte keuze

Als nominale spanning voor de middenspanning is 33 kV gekozen. 33 kV is een veel gebruikte standaard distributie spanning. Het 33 kV systeem van de FPV-installatie is via een 33/150 kV transformator aangesloten op het landelijke distributie net. Het spanningsniveau van de netaansluiting op het midden dan wel hoogspanningsnet is afhankelijk van de lokale netsituatie van de netbeheerder.

Met een zig zag sterpunt transformator aan de MS zijde is een impedantie geaard net gemaakt.

3.6 Ontwerp FPV-installatie variant B, DC combiner boxen

In Figuur 5 is variant B afgebeeld en zijn de aanpassingen van deze variant ten opzichte van de beschrijving in paragraaf 3.4 vastgelegd.



Figuur 5 FPV-installatie variant B.

3.6.1.1 Omschrijving ontwerp

De DC strings worden vanaf de PV modules aangesloten op een DC combiner box. In de DC combiner box is elke string apart beveiligd met een stringmeltveiligheid en wordt per string de stroom gemeten. Met een hoofdschakelaar kan de DC combiner box worden afgeschakeld. De DC combiner box is van kunststof.

Met behulp van een DC kabel wordt de DC combiner box verbonden met de omvormer. De omvormer is nu nabij het LS/MS transformator station geplaatst zodat korte AC kabels gebruikt kunnen worden.

Met een omvormer wordt de DC spanning omgezet in een 50 Hz wisselspanning. Voor dit referentieontwerp wordt hier voor een transformatorloze omvormer gekozen omdat deze het hoogste rendement heeft, circa 98-99%.

Als AC spanning is 800 Vac gekozen zodat de AC kabelverliezen lager zullen zijn en tevens de AC kabeldoorsnede beperkt kan worden. Doordat de AC kabel relatief dun is, is deze flexibeler en kan de AC kabel beter de bewegingen van de FPV volgen. Indien de omvormer op het ponton van het LS/MS transformatorstation is geplaatst en de AC kabel geen bewegingen hoeft te volgen, kan voor een niet-flexibele kabel worden gekozen.

Het metalen gestel van de omvormer moet geaard en vereffend zijn.

Ter reductie en voorkoming van de aardfoutstroom is gekozen voor een IT stelsel in het laagspanningsnet. Omdat dit een zwevend elektrisch stelsel is, kan er pas bij de tweede isolatiefout een foutstroom gaan lopen. De omvormer moet geschikt zijn voor een IT stelsel. De benodigde isolatiemonitoring in de omvormer dient hoogohmig te zijn en uitgevoerd als een spanningsmeting, om een mogelijk zwerfstroompad en een eerste fout in een IT stelsel te voorkomen.

Om de omvormer te beschermen tegen overspanning aan de DC zijde zijn de DC ingangen beschermd met een overspanningsbeveiliging, SPD type II. Om te voorkomen dat de omvormer als zender gaat functioneren dienen de uitgangen te zijn voorzien van een EMI filter, ferrietkraal om de DC kabels.

Om de omvormer te beschermen tegen een overspanning op de AC zijde is de AC ingang beschermd met een overspanningsbeveiliging, SPD type II. Om EMC problemen in het AC net te voorkomen dient de omvormer te zijn voorzien van een EMI filter. Het EMI filter onderdrukt de hogere harmonische spanningen en stromen in de aangesloten voeding.

Indien mogelijk wordt de omvormer aangesloten op een 800 V 3-fasennet zonder nul.

3.6.1.2 Afwegingen

In dit ontwerp is gekozen voor DC combiner boxen en een (centrale) omvormer afhankelijk van de grootte van de omvormer. Bij een uitgebreid DC net is het DC kortsluitvermogen groter. Doordat de PV modules bijna geen extra kortsluitstroom kunnen produceren werkt de overstrom- en kortsluitbeveiliging aan de DC zijde minder goed, dit is ook deels afhankelijk van de instraling. Alleen als er meer dan 2 strings parallel staan, kan de beveiliging afschakelen op

een overbelasting- of kortsluitstroom mits er voldoende zoninstraling is. Daarom moet de DC bekabeling kortsluitvast worden uitgelegd. Het totale DC kortsluitvermogen nabij de centrale omvormer is ten opzichte van de stringomvormer groter. Omdat een DC kortsluitstroom moeilijker is af te schakelen zullen ook de DC componenten kortsluitvast gekozen moeten worden. Een centrale omvormer heeft op de DC zijde een veel groter kortsluitvermogen. Dit levert bij een eventuele kortsluiting meer schade op.

Met de hoofdschakelaar in de DC combiner box is het mogelijk een deel van de installatie uit bedrijf te nemen voor onderhoud en reparatie.

Indien een DC kabel in het water terecht komt, is de optredende aardfoutstroom groter door het grote aantal PV modules.

3.6.1.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik zo min mogelijk componenten, "keep it simple". Daarom is gekozen om geen optimizers/micro omvormers per PV module te gebruiken, dit geeft ook een reductie van het aantal connectoren.
2.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn als de installatie op het water ligt.
3.	Grote DC kortsluitstroom	<ul style="list-style-type: none"> • Om te voorkomen dat een te grote DC kortsluitstroom ontstaat zal de PV generator, en daarmee het aantal PV modules, klein moeten worden gehouden. Door gebruik te maken van string omvormers wordt het DC kortsluitvermogen beperkt.
4.	Falen omvormer	<ul style="list-style-type: none"> • Om een grote uitval van de installatie te voorkomen wordt gebruikt gemaakt van meerdere kleine omvormers in plaats van één hele grote omvormer in de MW range.

3.6.1.4 Gemaakte keuze

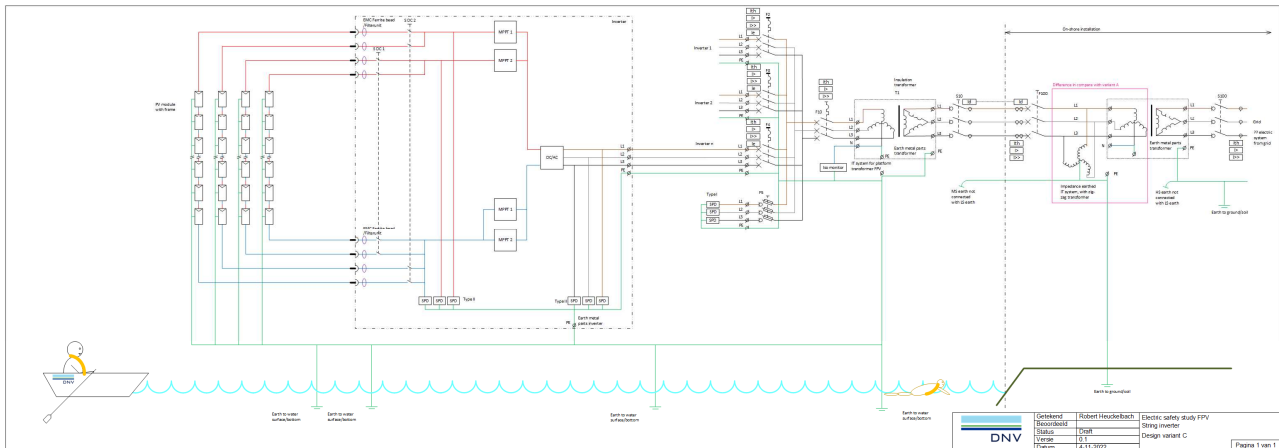
De omvormer is van het transformatorloze type. Er wordt niet voor optimizers/micro omvormers per PV module gekozen om het aantal componenten dat kan falen te beperken.

Variante B is bedacht om de impact van een toegenomen DC kortsluitvermogen te onderzoeken. Daarom is gekozen voor DC combiner boxen en een centrale omvormer. DC combiner boxen en dit type omvormer is goed te verkrijgen in de markt.

De omvormer wordt aangesloten op een 800 Vac netwerk volgens een IT-systeem.

3.7 Ontwerp PFV installatie variant C, MS net impedantie geaard

Variante C betreft het aansluiten van de FPV-installatie op het MS/HS station op land. In Figuur 5 is variant C afgebeeld en zijn de aanpassingen van deze variant ten opzichte van de beschrijving in paragraaf 3.4 vastgelegd.



Figuur 6 FPV-installatie variant C.

3.7.1.1 Omschrijving ontwerp

Het MS/HS transformatorstation is op land gebouwd.

In het transformatorstation is een middenspanningsverdeler, een transformator en een hoogspanningsverdeler aangebracht.

De LS/MS transformatorstations zijn op de middenspanningsverdeler aangesloten. De velden zijn beveiligd met vermogensschakelaars. De middenspanningsverdeler is via een vermogensschakelaar aangesloten op de transformator.

Het elektrisch stelsel van het laagspanningsnet is een impedantie-geaard IT stelsel om aardfoutstromen te beperken. De impedantieaarding wordt gerealiseerd met een zig-zag transformator.

De transformator zorgt voor een galvanische scheiding tussen de midden- en de hoogspanning.

De metalen gestellen zijn met de aarding en potentiaalvereffening van de het MS/HS station verbonden.

Doordat de aardschermen van MS kabels naar de LS/MS stations op het water zijn onderbroken zijn ook de zwerf-stroompaden onderbroken.

3.7.1.2 Afwegingen

Om een zo klein mogelijke energieverlies te realiseren wordt een olie-gekoelde transformator gebruikt.

3.7.1.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten, "keep it simple".
2.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn.

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
3.	Zwerfstromen	<ul style="list-style-type: none"> Door gebruik te maken van een impedantie-geaard IT stelsel is er een retourcircuit met weerstand voor de zwerfstroom via het sterpunt van de transformator. Door het aardscherm van de middenspanningskabel niet te verbinden met het aardstelsel van het LS/MS transformator station is het retourcircuit voor de zwerfstroom vanaf de landzijde onderbroken. De aarding van het aardscherm van de middenspanningskabel is aan de landzijde verbonden met het aardstelsel van het MS/HS station.
4.	Isolatiefout middenspanningskabel	<ul style="list-style-type: none"> Met een kabel differentiaal beveiliging is de middenspanningskabel beveiligd tegen aardfouten. Hiermee kan de fout snel worden gedetecteerd en afgeschakeld wat de elektrische veiligheid op en in het water ten goede komt.
5.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen laagspanning	<ul style="list-style-type: none"> De MS velden worden met vermogensschakelaars beveiligd.
6.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen middenspanning	<ul style="list-style-type: none"> De transformator wordt met een vermogensschakelaar beveiligd tegen overbelasting en kortsluiting.

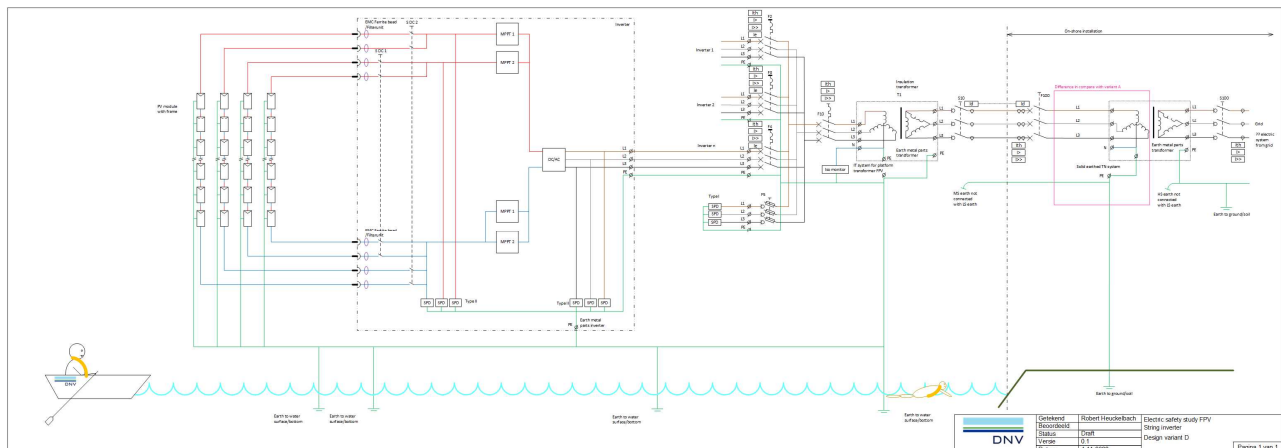
3.7.1.4 Gemaakte keuze

Als nominale spanning voor de middenspanning is gekozen voor 33 kV. Het 33 kV systeem van de FPV-installatie is via een 33 / 150 kV transformator aangesloten op het landelijke distributienet.

De sterpunttransformator is een zig-zag transformator met een homopolaire impedantie $Z_0 = 28,58 \Omega/\text{fase}$. Zie verder de netgegevens van het Krammer windpark waarop de FPV-installatie wordt aangesloten.

3.8 Ontwerp PFV installatie variant D, MS net impedantie geaard en 10 kV bedrijfsspanning

In Figuur 5 is variant D afgebeeld voor het aansluiten van de FPV-installatie op het MS/HS station op land en zijn de aanpassingen van deze variant ten opzichte van de beschrijving in paragraaf 3.4 vastgelegd.



Figuur 7 FPV-installatie variant D.

3.8.1.1 Omschrijving ontwerp

Het MS/HS transformatorstation is op land gebouwd.

In het transformatorstation is een middenspanningsverdeler, een transformator en een hoogspanningsverdeler aangebracht.

De LS/MS transformator stations zijn op de middenspanningsverdeler aangesloten. De velden zijn beveiligd met vermogensschakelaars. De middenspanningsverdeler is via een vermogensschakelaar aangesloten op de transformator.

Het elektrisch stelsel van het middenspanningsnet is een star geaard TN stelsel dat voorkomt in de 10 kV distributienetten van de regionale net beheerders.

De transformator zorgt voor een galvanische scheiding tussen de midden- en de hoogspanning.

De metalen gestellen zijn met het aarding en potentiaalvereffening van de het MS/HS station verbonden.

Doordat de aardschermen van MS kabels naar de LS/MS stations op het water zijn onderbroken zijn ook de zwerfstrompaden onderbroken.

3.8.1.2 Afwegingen

Om een zo klein mogelijke energieverlies te realiseren wordt een olie-gekoelde transformator gebruikt.

3.8.1.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Falen van componenten / installatie	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik zo min mogelijk componenten, "keep it simple".
2.	Extra onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik zo min mogelijk componenten. Plaats te onderhouden componenten op z'n plaats dat deze goed bereikbaar zijn.
3.	Zwerfstromen	<ul style="list-style-type: none"> • Door gebruik te maken van een star geaard TN stelsel is er retourcircuit zonder weerstand voor de zwerfstroom via het sterpunt van de transformator. • Door het aardscherm van de middenspanningskabel niet te verbinden met het aardstelsel van het LS/MS transformator station is het retourcircuit voor de zwerfstroom vanaf de landzijde onderbroken. De aarding van het aardscherm van de middenspanningskabel is aan de landzijde verbonden met het aardstelsel van het MS/HS station.
4.	Isolatiefout middenspanningskabel	<ul style="list-style-type: none"> • Met een kabel differentiaal beveiliging is de middenspanningskabel beveiligd tegen aardfouten. Hiermee kan de fout snel worden gedetecteerd en afgeschakeld wat de elektrische veiligheid op en in het water ten goede komt.
5.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen laagspanning	<ul style="list-style-type: none"> • De MS velden worden met vermogensschakelaars beveiligd.
6.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen middenspanning	<ul style="list-style-type: none"> • De transformator wordt met een vermogensschakelaar beveiligd tegen overbelasting en kortsluiting.

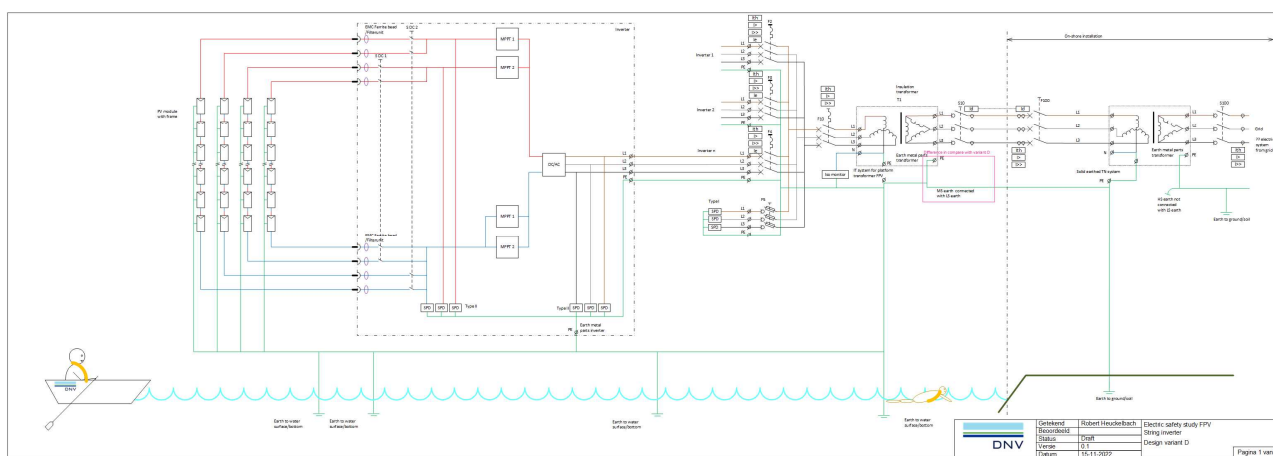
3.8.1.4 Gemaakte keuze

Als nominale spanning voor de middenspanning is 10 kV. Het 10 kV systeem van de FPV-installatie is via een 10 / 150 kV transformator aangesloten op het (landelijke) distributie net.

Het sterpunt van het MS netwerk is star geaard, 1 Ω naar aarde.

3.9 Ontwerp PFV installatie variant E, MS net star geaard en 10 kV bedrijfs-spanning

In Figuur 8 is variant E afgebeeld voor het aansluiten van de FPV-installatie op het MS/HS station op land en zijn de aanpassingen van deze variant ten opzichte van de beschrijving in paragraaf 3.8 vastgelegd. Variant E is toegevoegd omdat mogelijk het gehanteerde aardingsprincipe van het HS of MS van de DSO moet worden doorgezet om de beveiliging goed doen werken.



Figuur 8 FPV-installatie variant E.

3.9.1.1 Omschrijving ontwerp

Het MS/HS transformatorstation is op land gebouwd.

In het transformatorstation is een middenspanningsverdeler, een transformator en een hoogspanningsverdeler aangebracht.

De LS/MS transformator stations zijn op de middenspanningsverdeler aangesloten. De velden zijn beveiligd met vermogensschakelaars. De middenspanningsverdeler is via een vermogensschakelaar aangesloten op de transformator.

Het elektrisch stelsel van het middenspanningsnet is een star geaard TN stelsel dat voorkomt in de 10 kV distributienetten van de regionale net beheerders. Wat betreft het gedrag in het foutstroomcircuit zal een TN stelsel met een impedantie tussen het sterpunt en aarde (Peterson coil, aardingstransformator of weerstand) hetzelfde zijn echter de grootte van de aardfoutstroom is beperkt.

De transformator zorgt voor een galvanische scheiding tussen de midden- en de hoogspanning.

De metalen gestellen zijn met het aarding en potentiaalvereffening van de het MS/HS station verbonden.

De aardschermen van MS kabels vanaf land naar het LS/MS stations op het water zijn aangesloten. Hierdoor zijn ook deze metalen gestellen met elkaar gekoppeld. Bij een aardfout naar het metalengestel op de FPV-installatie gaat de aardfoutstroom nu via de aardverbinding terug naar de HS/MS voeding en niet door het water.

3.9.1.2 Afwegingen

Om een zo klein mogelijke energieverlies te realiseren wordt een olie-gekoelde transformator gebruikt.

3.9.1.3 Risico's en mitigerende maatregelen

Nr	Risico	Mitigerende maatregel
1.	Zwerfstromen	<ul style="list-style-type: none"> Door gebruik te maken van een star geaard TN stelsel is er retourcircuit zonder weerstand voor de zwerfstroom via het sterpunt van de transformator. Door het aardscherm van de middenspanningskabel te verbinden met het aardsysteem van het LS/MS transformator station is het retourcircuit voor de zwerfstroom vanaf de landzijde niet meer onderbroken. Via dit circuit kan dus een zwerfstroom gaan lopen. In geval van een aardfout in de midden spanning loopt de aardfoutstroom door deze aardverbinding niet door het water.
2.	Isolatiefout middenspanningskabel	<ul style="list-style-type: none"> Met een kabel differentiaal beveiliging is de middenspanningskabel beveiligd tegen aardfouten. Hiermee kan de fout snel worden gedetecteerd en afgeschakeld wat de elektrische veiligheid op en in het water ten goede komt. <p>Bij een star geaard systeem kan de aardfout ook gedetecteerd worden met een aardfoutbeveiliging in het relais te gebruiken, echter deze beveiliging is iets minder nauwkeurig.</p>
3.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen laagspanning	<ul style="list-style-type: none"> De MS velden worden met vermogensschakelaars beveiligd.
4.	Overbelasting en kortsluitbeveiligingen middenspanning	<ul style="list-style-type: none"> De transformator wordt met een vermogensschakelaar beveiligd tegen overbelasting en kortsluiting.

3.9.1.4 Gemaakte keuze

Als nominale spanning voor de middenspanning is 10 kV. Het 10 kV systeem van de FPV-installatie is via een 10/150 kV transformator aangesloten op het (landelijke) distributie net.

Het sterpunt van het MS netwerk is star geaard, 1 Ω naar aarde.

4 OPSTELLING REFERENTIEONTWERP

Om de simulaties en berekeningen voor het referentieontwerp te kunnen uitvoeren, zijn de keuzes in hoofdstuk 3 concreet gemaakt voor een opstelling voor een drijvend zonnepark in het laagbekken bij de Krammersluizen.

4.1 Uitgangspunten componenten

De volgende uitgangspunten zijn gekozen:

- Elk paneel een eigen drijver;
- Zuid oriëntatie;
- DC/AC ratio: 1,2;
- PV module van 500 Wp;

Eigenschappen van de PV module

- Maximaal vermogen: 500 W
- Spanning bij maximaal vermogen V_{mpp} : 42,8 V
- Stroom bij maximaal vermogen I_{mpp} : 11,69 A
- Openklemspanning V_{oc} : 51,7 V
- Kortsluitstroom I_{sc} : 12,28 A
- Modulerendement %: 20,7%

Fysieke eigenschappen van de PV modules

- Celtype: Monokristallijn
- Afmetingen: 2187 x 1102 x 35 mm
- Gewicht: 26.5 kg
- Glasdikte: 3.2 mm
- IP waarde kabeldoos: IP 68
- 24 stuk omvormers, 250 kW, 24 strings;
- Looppad breedte 0,6 m. Dit is tevens het looppad tussen de PV modules;
- Afstand tussen PV modules in een rij: 0,1 m;
- Transformator station van 2 x 3 MVA, totaal 6 MVA. Uk = 6%;
- Looppad waarin de transformatorstations zijn opgenomen: 5 m.

4.2 Uitgangspunten elektrisch systeem

In deze paragraaf staat per variant beschreven welke uitgangspunten voor het elektrische systeem zijn gekozen en gaat dieper in op de lek- en kortsluitstromen. De midden- en laagspanningskabels zijn per variant gelijk:

- Middenspanningskabel. 36 kV 300 mm² Cu; 0,25 μ F/km; kabellengte: 2,5 km.
Totale kabellengte in variant met de doorlusing via de wal is 3700 m en voor de variant waarbij de kabel is afgezonken 2250 m.
- Laagspanningskabel AC. C = 0,3 μ F/km; kabellengte: 2 km;

4.2.1 Aarding

Op elk hoekpunt van het FPV platform en steeds om de 50 m langs een zijde wordt een aardelektrode in het water geplaatst. Deze aardelektroden hebben een aardverspreidingsweerstand van maximaal 1 Ohm. Indien het water niet diep is wordt de aardelektrode tot in de bodem voortgezet.

4.2.2 Variant A

- IT stelsel bij HS/MS stelsel. Impedantie tussen sterpunt naar aarde: 10 M Ω ; aardfoutstroom voor de berekeningen in het middenspanningsdeel van de installatie 13 A (gebaseerd op de capacatieve laden kabel, $X_c = 5093 \Omega$);
- IT stelsel bij MS/LS stelsel. Impedantie tussen sterpunt naar aarde: 10 M Ω ; aardfoutstroom voor de berekeningen in het laagspanningsdeel van de installatie is 0,26 A (gebaseerd op de capacatieve laden van alle 800 V LS-kabels, $X_c = 5305 \Omega$);
- Elke aardelektrode heeft een water/aardverspreidingsweerstand van 1 Ω ;
- Isolatiweerstand van een AC laagspanningskabel AC is 100 M Ω ;
- Isolatiweerstand van een DC stringkabel is 10 M Ω ;
- Maximale DC lekstroom per string is 1500 V / 10 M Ω (DC stringkabel) + 10 Ω M (impedantie in sterpunt)= 0,075 mA;
- Maximale DC lekstroom per omvormer 24 stringen x 0,075 mA= 1,8 mA;
- Maximale DC lekstroom per FPV-installatie, 2 (links en rechter PV generator) x 24 omvormers x 1,8 mA = 86,4 mA;
- DC foutstroom naar aarde per string 1500 V / 10 M Ω (impedantie in sterpunt)= 0,15 mA.

4.2.3 Variant B

Uitgangspunten afwijkend van variant A:

- DC foutstroom naar aarde per combiner box kabel = 250 kW / 1100 V = 227 A. Doordat er een *over rating* van het DC vermogen ten opzichte van het AC omvormer vermogen zal zijn, die afhankelijk zal zijn van de zuid (1,3x) of oost west (1,6x) opstelling van de PV modules, rekening houden met een maximale stroom van 300 A.

Noot: voor de berekening is deze *worst case* situatie met TN stelsel gebruikt.

4.2.4 Variant C

Uitgangspunten afwijkend van variant A:

- Elektrisch stelsel van MS installatie is een impedantie geaard TN stelsel. Impedantie transformator op 33 kV zijde is 1,63 Ω en impedantie sterpuntaarding 28,5 Ω ; totaal 30,13 Ω . Maximaal optredende aardfoutstroom in aardcircuit via kabel is 695 A.
- Bij een aardverspreidingsweerstand van 1 Ω , een impedantie van transformator op 33 kV zijde 1,63 Ω en impedantie sterpuntaarding 28,5 Ω , totaal 31,13 Ω . Maximaal optredende aardfoutstroom in aardcircuit via het water is 673 A.

4.2.5 Variant D

Uitgangspunten afwijkend van variant A:

- Elektrisch stelsel van MS installatie is een star geaard TN stelsel. Impedantie transformator op 33 kV zijde is 1,63 Ω . Maximaal optredende aardfoutstroom in aardcircuit via kabel is 12.857 A.
- Bij een aardverspreidingsweerstand van 1 Ω en een impedantie van transformator op 33 kV zijde 1,63 Ω totaal 2,63 Ω . Maximaal optredende aardfoutstroom in aardcircuit via het water is 7.968 A.

4.2.6 Variant E

Uitgangspunten afwijkend van variant D:

- Elektrisch stelsel van MS installatie is een star geaard TN stelsel. Impedantie transformator op 33 kV zijde is $1,63 \Omega$. Maximaal optredende aardfoutstroom in aardcircuit via kabel is 12.857 A. Doordat de aarding van HS/MS transformator station is gekoppeld met de MS/LS station loopt er geen aardfoutstroom meer door het water.

4.3 Afmetingen drijvende constructie

De installatie moet voldoende afstand tot het dijktaalud houden voor voldoende ruimte voor de verankering. Ook is een strook zwemwater aan het strand van het laagbekken gewenst. De lengte van het laagbekken is 1.330 m en de breedte is 240 m. Effectief blijft er circa 1.200 m bij 200 m over.

4.3.1 PV generator

Uitgaande van een 6.000 kVA transformator, een DC/AC ratio van 1,2 en 500 Wp PV modules kan één PV-veld uit 14.400 modules bestaan ($1,2 \times 6.000 \text{ kVA} / 0,5 \text{ kWp}$). De stringlengte voor een 1500 Vdc systeem bedraagt 28 PV modules (berekend bij $-10 \text{ }^\circ\text{C}$). Het aantal volledige strings bedraagt 514 wat correspondeert met 14.392 PV-modules.

De rijafstand is bepaald op 1,73 m (module breedte + looppad breedte, is $1,13 \text{ m} + 0,6 \text{ m}$). Mogelijk aantal rijen is circa $200 \text{ m water breedte} / 1,73 \text{ m}$ en geeft afgerond 115 mogelijke rijen. Er is nu geen ruimte van de drijvende constructie tot de wal aangehouden.

Gekozen is voor 3 strings van 28 PV modules in elke rij aan beide zijden van het looppad. Dus $3 \times 2 \times 28 \text{ PV modules} = 168 \text{ PV modules}$ per rij. Voor 14.392 PV modules is dit 85,667 rijen. Kies 86 rijen. Afmeting is $86 \times 1,73 = 149 \text{ m}$. De breedte van het PV-veld is $168 \times (2,1 \text{ m} + 0,1 \text{ m}) + 5 \text{ m} = 375 \text{ m}$. Eén FPV platform is hiermee 375 m breed en 149 m hoog. Dit past in de breedte van het water inclusief voldoende afstand tot de kant en ruimte voor ankering. Indien men afstand tussen de FPV platformen houdt, kunnen er 3 naast elkaar worden gelegd. Daarmee heeft de FPV-installatie een vermogen van 21,6 MWp en 18 MVA.

Op gemerkt wordt dat het platform nog één derde groter gemaakt kan worden, namelijk 115 rijen, waardoor de maximale capaciteit uitkomt op circa $3 \times 9,66 \text{ MWp} = 28,9 \text{ MWp}$ en een AC vermogen van 24 MVA. Echter het bassin wordt dan helemaal vol gelegd.

Voor het bepalen van de zwemwaterveiligheid wordt de afmeting van 375 m breed en 149 m hoog aangehouden.

4.3.2 Verbinding met hoogspanningsstation

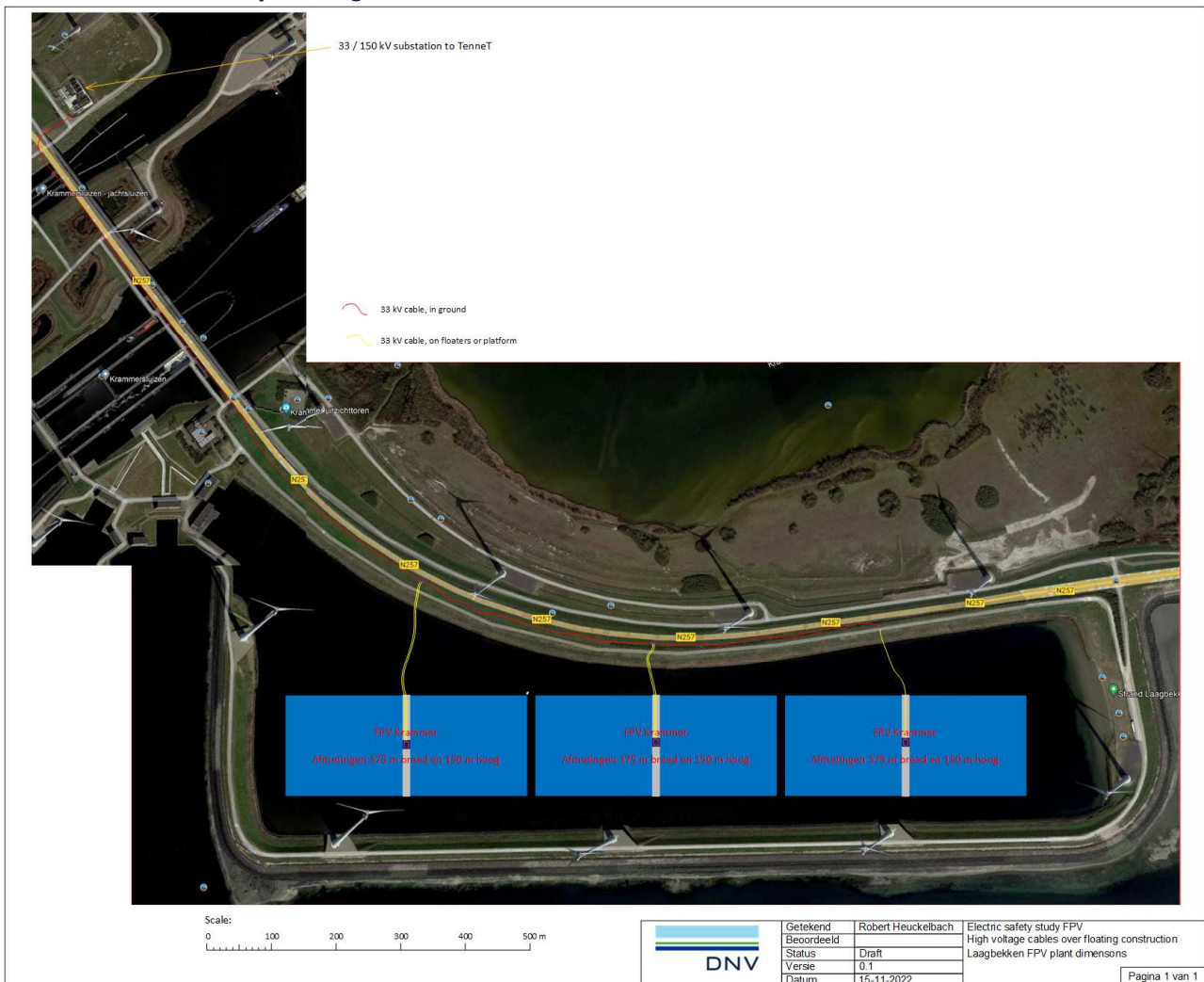
De FPV-installatie kan op meerdere manieren worden verbonden met het HS station. In Figuur 9 is elke FPV-installatie met een hoogspanningskabel direct naar het land verbonden. In Figuur 10 is er doorgelust naar het volgende FPV eiland (dus geen afzonderlijke kabels parallel naar het hoogspanningsstation) om zo veel mogelijk kabel te besparen. De kabelverbinding tussen het FPV eiland en de wal moet zijn uitgevoerd als een flexibele marine kabel met aardscherm. Op de wal wordt de flexibele kabel met een mof gekoppeld op een standaard grondkabel. Optimaal is om de kabelverbinding uit één stuk te maken en geen moffen te gebruiken.

De kabelverbinding kan op drijvers of door het water, over de bodem, worden aangelegd. Als deze op drijvers wordt aangelegd is het voor onbevoegden vrij eenvoudig om over deze drijvende constructie naar het eiland te lopen. Omdat de middenspanningskabel is voorzien van een aardscherm en beveiligd is met een differentiaal en/of aardfoutbeveiliging is ongeacht de wijze van aanleg bij het optreden van een fase-aardkortsluiting dezelfde detectie- en afschakeltijd van toepassing. Een fase naar water kortsluiting van een *single core* is door de aanwezigheid van het aardscherm niet mogelijk om dat bij onderdompeling van de *single core* kabel ook direct het aardscherm wordt ondergedompeld. Hierdoor is er geen bezwaar om de kabel onderwater aan te leggen. In feite ontstaat nu dezelfde constructie als voor een afgezonken kabel. Doordat er geen drijvende constructie meer is, kan er geen onbevoegde via de drijvers naar het FPV eiland,

lopen en de kabelverbinding beschadigen. Kapot varen is niet meer mogelijk, hooguit zou met een anker de kabel beschadigd kunnen worden. Dit is vergelijkbaar met een afgezonken kabel.

In Figuur 10 is het ontwerp met afgezonken middenspanningskabels weergegeven. Bekend is dat kabelmoffen vaker falen dan een kabel uit één stuk, kabelmoffen tussen twee verschillende kabeltypen zijn iets meer faalgevoelig door de verschillende materiaaleigenschappen. Doordat in het ontwerp met de afgezonken hoogspanningskabels ook minder kabelmoffen nodig zijn, is de faalkans kleiner. Optimaal is om de kabelverbinding uit één stuk te maken en geen moffen te gebruiken. Tevens is in dit ontwerp de kabel het kortst.

4.3.2.1 Middenspanningskabeltracé tussen de eilanden via de wal



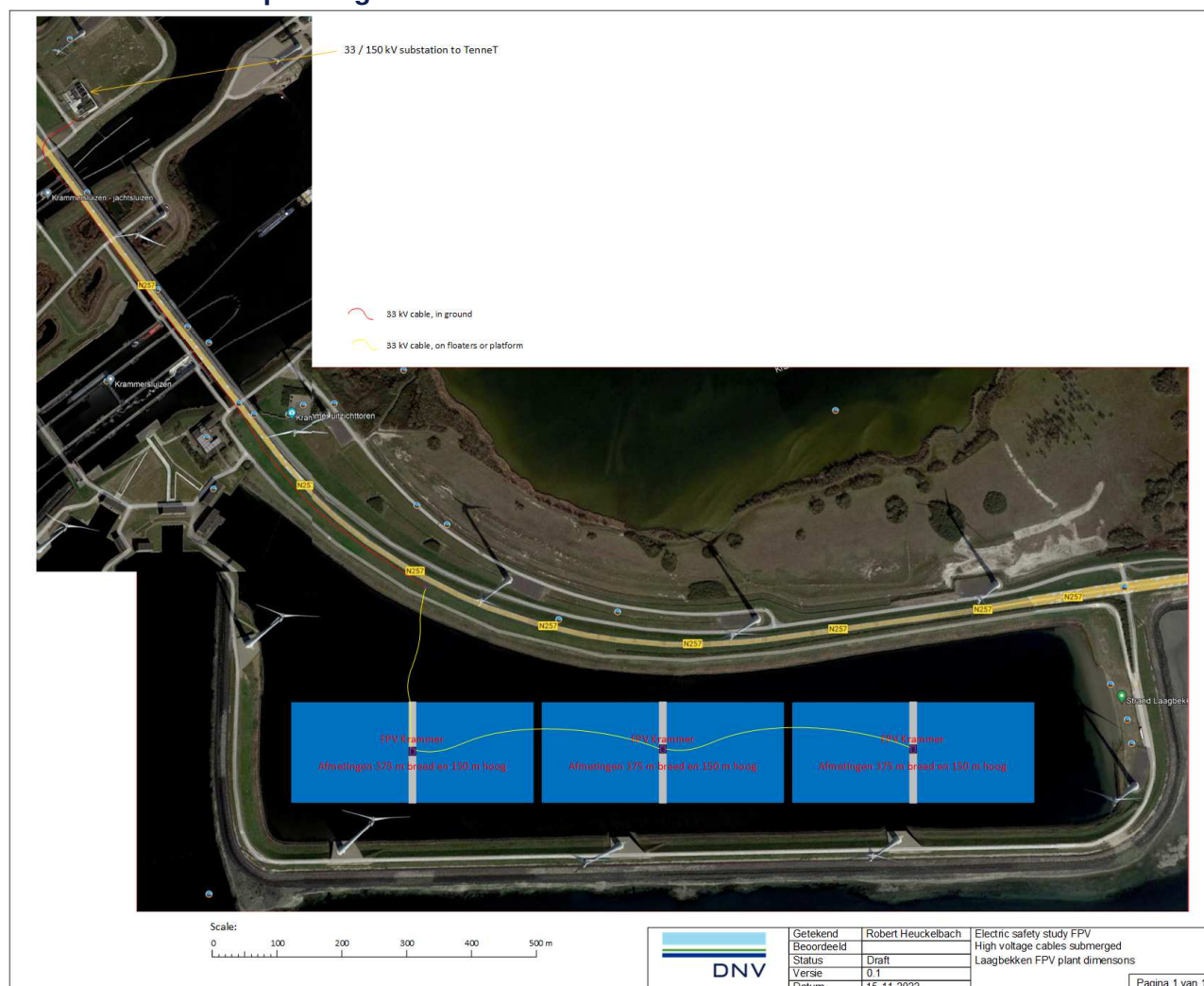
Figuur 9 Hoogspanningskabels via de wal.

Voor de kabelverbinding wordt uitgegaan van een FPV-installatie van 24 MVA verdeeld over 3 eilanden (de gekozen kabeldoorsnede kan wat betreft belastingstroom meer dan 18 MVA aan waardoor hier gekozen is voor 24 MVA). Het middenspanningsniveau is 33 kV. De kabel gaat van eiland naar eiland via het water, land en water, zie Figuur 9.

Tabel 1 Specificaties van middenspanningskabels behorende bij figuur 9

Van	Naar	Belastings- stroom	Beschrijving middenspanningskabels	Lengte
HS station	1 ^e eiland (links)	420 A	2 x 3 x YMeKrvasdldwd 18/30 kV 1 x 70 rs+as 25	1600 m
1 ^e eiland (links)	2 ^e eiland (links)	280 A	3 x YMeKrvasdldwd 18/30 kV 1 x 120 rs+as 25 or VG-YMvKrvasmb 18/30 kV 3 x 150 rs+as 50	1000 m
2 ^e eiland (links)	3 ^e eiland (links)	140 A	3 x YMeKrvasdldwd 18/30 kV 1 x 70 rs+as 25 or VG-YMvKrvasmb 18/30 kV 3 x 50 rs+as 50	1100 m

4.3.2.2 Middenspanningskabeltracé tussen de eilanden via de water



Figuur 10 Afgezonken hoogspanningskabels.

Voor de kabelverbinding wordt uitgegaan van een FPV-installatie van 24 MWac verdeeld over 3 eilanden. Het middenspanningsniveau is 33 kV. De kabel gaat van eiland naar eiland door het water, zie Figuur 10.

Tabel 2 Specificaties van middenspanningskabels behorende bij figuur 10

Van	Naar	Belastinstroom	Beschrijving middenspanningskabels	Lengte
HS station	1 ^e eiland (links)	420 A	2 x 3 x YMeKrvasdldwd 18/30 kV 1 x 70 rs+as 25	1600 m
1 ^e eiland (links)	2 ^e eiland (links)	280 A	3 x YMeKrvasdldwd 18/30 kV 1 x 120 rs+as 25 or VG-YMvKrvasmb 18/30 kV 3 x 150 rs+as 50	425 m
2 ^e eiland (links)	3 ^e eiland (links)	140 A	3 x YMeKrvasdldwd 18/30 kV 1 x 70 rs+as 25 or VG-YMvKrvasmb 18/30 kV 3 x 50 rs+as 50	425 m

5 BEVEILIGING

In dit hoofdstuk is een toelichting gegeven op de gekozen beveiligingen in het referentieontwerp.

5.1 DC beveiliging string

Indien er meer dan twee strings parallel zijn geschakeld moet elke PV string aan de plus en de min zijde worden beveiligd met een smeltveiligheid van 20 A gPV (waarde afhankelijk van PV modulespecificaties) om korsluitingen in de PV string te kunnen afschakelen.

5.2 AC beveiliging omvormer

Voor een snelle afschakeling van een foutsituatie dient de omvormer-eindgroep voorzien te zijn van een vermogensschakelaar. De vermogensschakelaar moet de volgende beveiligingsfuncties hebben:

- Overbelastingsbeveiliging;
- Kortsluitbeveiliging;
- Aardfoutbeveiliging (is eigenlijk een differentiaalbeveiliging op de in- en uitgaande stromen van de vermogensschakelaar). Deze beveiligingsfunctie gaat werken na de eerste aardfout (isolatiefout).

Aan de eindgroepbeveiliging wordt een selectieve isolatiefoutdetectie functie toegevoegd zodat de beveiliging instaat is om alleen de defecte eindgroep te detecteren en hierna te af te schakelen. De “gezonde” eindgroepen kunnen dan in bedrijf blijven.

5.3 AC beveiliging laagspanningshoofdvermogensschakelaar

De laagspanningshoofdvermogensschakelaar beveiligd de laagspanningsverdeler. De vermogensschakelaar F10 moet de volgende beveiligingsfuncties hebben:

- Overbelasting;
- Kortsluiting.

5.4 Beveiliging LS/MS transformator

De beveiliging van de LS/MS transformator wordt gerealiseerd met de vermogensschakelaar F100 die het middenspanningskabelveld in het HS station is aangebracht.

Het elektrische stelsel na de LS/MS transformator is een IT stelsel en moet voorzien zijn van isolatiebewaking. De isolatiebewaking moet de laagspanningsinstallatie met vermogensschakelaar F100 afschakelen als isolatiewaarde van het laagspanningsnet te laag wordt. Voor de isolatiebewaking zijn aanvullende meetspoelen aangebracht om een selectieve afschakeling van een defecte eindgroep in de laagspanningsverdeler mogelijk te maken.

5.5 Beveiliging MS kabel tussen wal en FPV-installatie

Voor een snelle afschakeling van een foutsituatie dient het kabelveld te zijn voorzien van een vermogensschakelaar. Deze vermogensschakelaar F100 beveiligd tevens de LS/MS transformator van de FPV-installatie. De vermogensschakelaar moet de volgende beveiligingsfuncties hebben:

- Differentiaal beveiliging over de drijvende/afgezonken middenspanningskabel zodat zeer snel kan worden afgeschakeld bij een aardfout;
- Aardfoutbeveiliging als back up van de differentiaal beveiliging;
- Overbelastingsbeveiliging;
- Kortsluitbeveiliging, is back up van de differentiaal beveiliging bij een kortsluiting in de kabel.

5.6 Beveiliging MS/HS transformator

Voor een snelle afschakeling van een foutsituatie dient het transformatorveld te zijn voorzien van een vermogensschakelaar. De vermogensschakelaar moet de volgende beveiligingsfuncties hebben:

- Differentiaal beveiliging over de transformator zodat zeer snel kan worden afgeschakeld bij een aardfout.
- Aardfoutbeveiliging als back up van de differentiaal beveiliging indien het sterpunt is geaard;
- Overbelastingsbeveiliging;
- Kortsluitbeveiliging, is back up van de differentiaal beveiliging bij een kortsluiting in de transformator.

Noot: Bij de HS installatie van de Krammersluizen zou deze beveiliging reeds aanwezig moeten zijn voor het windpark.

Indien het elektrische stelsel na de HS/MS transformator een IT stelsel is, moet een isolatiebewaking worden aangebracht. De isolatiebewaking moet de installatie afschakelen als de isolatiewaarde van het middenspanningsnet te laag wordt.

6 FOUTSCENARIO'S

Voor het vinden van de veilige zwemafstand wordt uitgegaan van de hoogst mogelijke optredende bedrijfsstromen en kortsluitstromen. Foutstromen ten gevolge van dubbele fouten zijn hierbij inbegrepen. Onder de bedrijfsstromen worden ook de lekstromen van de installatie gerekend. Voor alle varianten is het voorliggende hoogspanningsnetwerk, dat galvanisch scheiden is van de FPV-installatie, niet meegenomen in de foutscenario's. De stroomwaarden zijn berekend en er is naar boven afgerond voor een conservatieve aanname.

Aan de hand van het referentieontwerp zijn eerste de mogelijke foutscenario's voor variant A in kaart gebracht. De afwijkende foutscenario's voor de varianten B, C en D zijn in losse tabellen weergegeven.

6.1 Foutscenario's variant A

Nr	Omschrijving foutscenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
1.	3 fasen kortsluiting in HS station. (2 fasen fout werkt hetzelfde)	Stroom loopt door de 3 transformatorwikkelingen via de geleiders naar de fout plaats.	Nee	De kortsluiting zit voor vermogensschakelaar F100. De HS vermogensschakelaar (kortsluitbeveiliging) moet de kortsluiting afschakelen. Deze HS vermogensschakelaar is van de DSO of TenneT en valt buiten scope.	Buiten scope	Buiten scope
2.	Fase aarde kortsluiting in HS station	Transformatorwikkeling HS/MS, geleider naar fout plaats, aardcircuit, OPEN VERBINDING naar sterpunt transformator. GEEN foutpad aanwezig.	Nee	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Met isolatiebewaking wordt gecontroleerd of er isolatiefout optreedt. Wanneer een isolatiefout wordt gedetecteerd wordt de installatie afgeschakeld door vermogensschakelaar F100. Mocht de isolatiefout voor vermogensschakelaar F100 zitten dan zal de HS vermogensschakelaar van de DSO of TenneT moeten uitgeschakeld, deze valt buiten scope. Foutpad ligt bijna geheel buiten zwemwater	Nihil.	Nvt
3.	3 fasen kortsluiting in kabel naar drijvend MS/LS station. (2 fasen fout werkt hetzelfde)	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, kabel, foutplaats, via kabel en vermogensschakelaar terug naar HS/MS transformator.	Nee	MS vermogensschakelaar F100 (kortsluitbeveiliging) moet de kortsluiting afschakelen. Mocht de fout escaleren tot een 3 fasen aarde fout dan is er geen circuit terug omdat een IT stelsel is gebruikt.	Nvt	0,6 s
4.	Fase aarde kortsluiting in kabel naar drijvend MS/LS station.	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, kabel naar fout plaats, aardcircuit/water, OPEN VERBINDING naar sterpunt transformator. GEEN foutpad aanwezig.	Ja	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Door de differentiaal beveiliging over de drijvende kabel wordt een aardfoutstroom direct gedetecteerd en vermogensschakelaar F100 getript. Tevens zal de isolatiefout bewaking de fout detecteren en vermogensschakelaar F100 uitschakelen.	13 A ac (laadstroom kabel), Nihil	5 s
5.	3 fasen kortsluiting in MS/LS transformator (2 fasen fout werkt hetzelfde)	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, kabel, schakelaar, transformator, schakelaar, kabel en vermogensschakelaar terug naar HS/MS transformator.	Nee	MS vermogensschakelaar F100 (kortsluitbeveiliging) moet de kortsluiting afschakelen. Mocht de fout escaleren tot een 3 fasen aarde fout dan is er geen circuit terug omdat een IT stelsel is gebruikt.	Nvt	0,6 s

Nr	Omschrijving foutsценario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
6.	Fase aarde kortsluiting in MS/LS station	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, kabel fout plaats, aardcircuit/water, OPEN VERBINDING naar sterpunt transformator. GEEN foutpad aanwezig.	Ja	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Met isolatiebewaking wordt gecontroleerd of er isolatiefout optreedt. Wanneer een isolatiefout wordt gedetecteerd wordt de installatie afgeschakeld door vermogensschakelaar F100.	13 A ac (laadstroom kabel), Nihil.	5 s
7.	3 fasen fout voor LS vermogensschakelaar F 10. (2 fasen fout werkt hetzelfde)	Stroom loopt door de 3 MS/LS transformatorwikkelingen via de geleiders naar de fout plaats.	Nee	Beveiliging tegen kortsluiting in het LS station. De vermogensschakelaar (kortsluitbeveiliging) F100 aan MS zijde moet de fout afschakelen.	Nvt	0,3
8.	Fase aarde kortsluiting in MS/LS station. Voor F10	Transformatorwikkeling LS, geleider naar fout plaats, aardcircuit, OPEN VERBINDING naar sterpunt MS/LS transformator. GEEN foutpad aanwezig.	Nee	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Met isolatiebewaking wordt gecontroleerd of er isolatiefout optreedt. Wanneer een isolatiefout wordt gedetecteerd wordt de installatie afgeschakeld door vermogensschakelaar F10. Mocht de isolatiefout voor vermogensschakelaar F10 zitten dan zal de MS vermogensschakelaar F100 moeten worden uitgeschakeld.	0,26 A ac (laadstroom alle LS-kabels), Nihil.	5 s
9.	3 fasen fout in de LS verdeler. (2 fase fout werkt hetzelfde)	Transformatorwikkeling MS/LS, vermogensschakelaar, kabel, foutplaats, via kabel en vermogensschakelaar terug naar MS/LS transformator.	Nee	LS vermogensschakelaar F10 (kortsluitbeveiliging) moet de kortsluiting afschakelen.	Nvt	0,3 s
10.	Fase aarde kortsluiting in LS verdeler.	Transformatorwikkeling LS, vermogensschakelaar, geleider naar fout plaats, aardcircuit, OPEN VERBINDING naar sterpunt MS/LS transformator. GEEN foutpad aanwezig.	Nee	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Met isolatiebewaking wordt gecontroleerd of er isolatiefout optreedt. Wanneer een isolatiefout wordt gedetecteerd wordt de installatie afgeschakeld door vermogensschakelaar F10.	0,26 A ac (laadstroom alle LS-kabels), Nihil.	5 s
11.	2 fasen fout bij de omvormer. (3 fase fout werkt hetzelfde)	Transformatorwikkeling MS/LS, vermogensschakelaar, kabel, foutplaats bij omvormer, via kabel en vermogensschakelaar terug naar MS/LS transformator.	Nee	LS vermogensschakelaar F10 (kortsluitbeveiliging) moet de kortsluiting afschakelen.	Nvt	0,1 s

Nr	Omschrijving fouts scenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
12.	Fase aarde kortsluiting in kabel of bij omvormer.	Transformatorwikkeling LS, vermogensschakelaar F10, kabel, vermogensschakelaar F4 naar fout plaats, aardcircuit, OPEN VERBINDING naar sterpunt MS/LS transformator. GEEN foutpad aanwezig.	Ja	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Doordat de DC kabel onder de constructie ligt binnen de aardelektroden is stroombuiten het platvorm beperkt. Met isolatiebewaking wordt gecontroleerd of er isolatiefout optreedt. Wanneer een isolatiefout wordt gedetecteerd wordt de installatie afgeschakeld door vermogensschakelaar F10. Indien detectie van de isolatiefoutstroomcircuits op elke eindgroep wordt geplaatst kan selectief de vermogensschakelaar van de eindgroep (in dit geval F4) worden uitgeschakeld. Als back-up is de eindgroepbeveiliging in F4 voorzien van aardlekbeveiliging welke na de tweede isolatiefout zal aanspreken. Aardlekschakelaar type A, $I_{\Delta} = 30 \text{ mA}$.	0,26 A ac (laadstroom alle LS-kabels), Nihil.	5 s
13.	DC fout in of bij omvormer	PV modules, stringkabel, foutplaats en via stringkabel weer terug	Nee	Deze DC foutschakeling is niet te beveiligen. Een smeltveiligheid kan geen verschil tussen I_{MPPT} en I_{sc} detecteren. De bekabeling moet daarom kortsluitvast zijn. Bij meer dan 2 parallele stringen kan afhankelijk van de foutplaats een smeltveiligheid in de string met de fout de kortsluiting afschakelen.	Nvt	Ntb
14.	DC fout naar aarde	PV modules, stringkabel, foutplaats naar aarde/water, OPEN VERBINDING naar sterpunt MS/LS transformator, via 3 fasen naar omvormer, stringkabel terug naar de PV modules	Ja	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Doordat de DC kabel onder de constructie ligt binnen de aardelektroden is stroombuiten het platvorm beperkt. De aardlekbeveiliging/isolatiebewaking van de omvormer moet de aardfout detecteren en de omvormer uitschakelen. Echter de aardfout blijft actief zolang de PV modules actief zijn.	0,15 mAdc (laadstroom DC kabel), Nihil	Oneindig

6.2 Fouts scenario's variant B

Nr	Omschrijving fouts scenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
1.	DC fout in of bij omvormer of string bekabeling	PV modules, stringkabel, foutplaats en via stringkabel weer terug	Nee	Deze DC foutschakeling is niet te beveiligen. Een smeltveiligheid kan geen verschil tussen I_{MPPT} en I_{sc} detecteren. De bekabeling moet daarom kortsluitvast zijn. Bij meer dan 2 parallele stringen kan afhankelijk van de foutplaats een smeltveiligheid in de string met de fout de kortsluiting afschakelen.	Ntb	Ntb

Nr	Omschrijving fouts scenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
2.	DC string fout naar aarde	PV modules, stringkabel, foutplaats naar aarde/water, OPEN VERBINDING naar sterpunt MS/LS transformator, via 3 fasen naar omvormer, stringkabel terug naar de PV modules	Ja	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Doordat de DC kabel onder de constructie ligt binnen de aardelektroden is stroombuiten het platform beperkt. De aardlekbeveiliging/isolatiebewaking van de omvormer moet de aardfout detecteren en de omvormer uitschakelen. Echter de aardfout blijft actief zolang de PV modules actief zijn.	0,15 mA dc (laadstroom DC kabel), Nihil	Oneindig
3.	Kortsluiting in de DC kabel tussen combiner box en de omvormer	PV modules, stringkabels, combiner box, DC kabel naar foutplaats, DC kabel, combiner box, via de stringkabel terug naar de PV modules.	Nee	Deze DC foutcircuit is niet te beveiligen. Een smeltveiligheid kan geen verschil tussen I_{MPPT} en I_{sc} detecteren. De bekabeling moet daarom kortsluitvast zijn.	Ntb	Ntb
4.	Aardfout in de DC kabel naar de omvormer.	PV modules, stringkabel, foutplaats naar aarde/water, OPEN VERBINDING naar sterpunt MS/LS transformator, via 3 fasen naar omvormer, stringkabel terug naar de PV modules.	Ja	Door IT stelsel geen gesloten fout pad. Doordat de DC kabel onder de constructie ligt binnen de aardelektroden is stroombuiten het platform beperkt. De aardlekbeveiliging/isolatiebewaking van de omvormer moet de aardfout detecteren en de omvormer uitschakelen. Echter de aardfout blijft actief zolang de PV modules actief zijn.	300 A dc	Oneindig

6.3 Fouts scenario's variant C

Nr	Omschrijving fouts scenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
1.	1 fase aardfout in drijvende MS kabel	Wikkeling HS/MS transformator, vermogensschakelaar, drijvende kabel, foutplaats, aarde, aardingstransformator, via 3 fasen terug naar HS/MS transformator.	Nee	Door de differentiaal beveiliging over de drijvende kabel wordt een aardfoutstroom direct gedetecteerd en vermogensschakelaar F100 getript. Gezien de lage impedantie zal ook de aardfout/kortsluitbeveiliging van F100 aanspreken. De foutstroom wordt beperkt door de aardingstransformator.	695 A ac Beperkt	0,1 s
2.	Fase aarde kortsluiting in MS/LS station	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, drijvende kabel, foutplaats, aardcircuit/water, sterpunttransformator naar sterpunt HS/MS transformator.	Ja	Op de optredende aardfout spreekt de aardfoutbeveiliging aan en schakelt vermogensschakelaar F100 uit.	673 A ac, Beperkt	0,3 s

6.4 Foutscenario's variant D

Nr	Omschrijving foutscenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
1.	1 fase aardfout in drijvende MS kabel	Wikkeling HS/MS transformator, vermogensschakelaar, drijvende kabel, foutplaats, aarde, direct naar sterpunt HS/MS transformator.	Nee	Door de differentiaal beveiliging over de drijvende kabel wordt een aardfoutstroom direct gedetecteerd en vermogensschakelaar F100 getript. Gezien de lage impedantie zal ook de aardfout/kortsluitbeveiliging van F100 aanspreken.	12857 A, Groot	0,3 s
2.	Fase aarde kortsluiting in MS/LS station	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, drijvende kabel, foutplaats, aardcircuit/water, direct naar sterpunt HS/MS transformator.	Ja	De aardfoutbeveiliging spreekt aan en schakelt vermogensschakelaar F100 uit.	7968 A (ge-rekend met aardcircuit impedantie 1 Ω), Groot	0,3 s

Opmerking: Gezien de grote foutstroom door het water is deze variant D geen veilige optie voor een FPV-installatie.

6.5 Foutscenario's variant E

Nr	Omschrijving foutscenario	Beschrijving stroompad	Stroompad door het water	Mitigerende maatregel	Stroomsterkte	Afschakel tijd fout
1.	Fase aarde kortsluiting in MS/LS station	Transformatorwikkeling HS/MS, vermogensschakelaar, drijvende kabel, foutplaats, drijvende kabel, direct naar sterpunt HS/MS transformator.	Nee	De aardfoutbeveiliging spreekt aan en schakelt vermogensschakelaar F100 uit.	12857 A, Groot	0,3 s

6.6 Evaluatie van varianten en selectie van foutscenario's

In deze paragraaf wordt een evaluatie gemaakt van de uitgewerkte foutscenario's met als doel om twee *worst case* scenario's te selecteren voor het vervolg van het onderzoek. De elektrische veiligheid is beoordeeld op het pad van het foutcircuit, al dan niet door het water, en de grootte van de optredende foutstroom. Een foutcircuit dat niet door het water loopt, wordt niet meegenomen omdat het geen risico vormt voor zwemwaterveiligheid.

Wat betreft de elektrische veiligheid is variant A het veiligst. Variant B met een combinerbox en lokale string omvormer of een grote centrale omvormer is gezien de DC foutstroom die via het water kunnen lopen en die niet door de smeltveiligheden worden onderbroken relatief onveilig. Voor de DC-zijde wordt daarom het vierde scenario van variant B gekozen met een foutstroom van 300 A voor het vervolg van het onderzoek.

Bij een aardfout in de middenspanningskabel, tussen wal en de FPV, loopt in de varianten A en B geen aardfoutstroom omdat hier een IT stelsel is gemaakt.

De aarding van variant C beperkt de aardfoutstroom, TN stelsel met aardingstransformator, maar omdat deze door het water loopt (geen aardverbinding tussen drijvende constructie en walstation) is deze variant niet optimaal. De hoogste foutstroom door het water bedraagt 7.968 A ten gevolge van de gekozen impedantie van de aardingstransformator (sterpuntsbehandeling).

Variant D is onveilig omdat de circuitweerstand zeer laag, TN stelsel, is en de foutstroom door het water zeer hoog is omdat er geen aardverbinding tussen drijvende constructie en walstation aanwezig is. De hoogste aardfoutstroom door het water bedraagt 12.857 A.

Variant E is veilig omdat de circuitweerstand iets hoger is, TN stelsel met aardingstransformator/spoel/weerstand, en de aardfoutstroom niet door het water loopt maar via de aardverbinding die tussen drijvende constructie en walstation

aanwezig is. De hoogst van de aardfoutstroom is grotendeels afhankelijk de gekozen impedantie van de aardingstransformator/spoel/weerstand.

Voor de ESD simulaties is met de aardfoutstroom van 7968 A van variant C gerekend.

Bronbestrijding

Voor de zwemwaterveiligheid is het noodzakelijk om altijd een aardverbinding, via het kabelaardscherm en eventueel aanvullende losse aardkabels, te hebben tussen het walstation en de drijvende constructie. Hierdoor loopt er geen aardfoutstroom door het water maar door de aardverbinding.

Als er een aardverbinding aanwezig is geen ontwerp beperking voor de verbinding tussen de wal en de drijvende constructie. Om de schade te minimaliseren is het wel wenselijk om de aardfoutstroom zoveel mogelijk te begrenzen. Dit kan met een impedantie tussen het sterpunt van de transformator en aarde.

Effectbestrijding

Mocht de aardfout optreden in de verbindingkabel dan zal de differentiaalbeveiliging over de kabel deze direct, < 100 ms, detecteren en afschakelen.

Als back-up voor de differentiaalbeveiliging is de aardfoutbeveiliging aanwezig. Mocht een aardfout in de kabel niet gedetecteerd worden dan zal de aardfout deze alsnog detecteren en met een kleine tijdvertraging afschakelen. Treedt een aardfout op de drijvende constructie op dan zal de aardfoutbeveiliging deze detecteren en afschakelen.

De boven genoemde bron- en effectbestrijding dient door Rijkswaterstaat verplicht te worden gesteld als voorwaarde voor een te realiseren FPV-installatie. De voorgaande analyse is geënt op de situatie bij de Krammersluizen en geldt ook voor de Kreekraksluizen waarbij een ontwerp dusdanig gekozen dient te worden dat de aardfoutstroom door het water maximaal 7.968 A bedraagt.

7 EMC

In het document “Kaders en richtlijnen – Drijvende zonneparken en EMC” /6/ zijn voorwaarden en principes voor het voorkomen van EMC-problemen beschreven. Aan de hand van dit document en NEN 1010 zijn in het referentieontwerp voor FPV diverse voorzieningen getroffen die de EMC-beïnvloeding beperken, te weten:

- Om EMC-beïnvloeding van de PFV-installatie te voorkomen (overspanning door blikseminslag in de nabijheid) zijn in dit referentieontwerp de plus- en mingeleider van de PV-strings bij elkaar gelegd en liggen parallel met een aardgeleider of geaard constructiedeel (zie NEN 1010 712.521.102). Dit is de zogenaamde DC-loop van de string. Het oppervlak van deze DC-loop moet zo klein mogelijk zijn.
Doordat de DC-loop klein is, is ook het elektrische veld, veroorzaakt door de common mode wisselspanning die tussen de DC-loop en aarde staat, klein. De common mode wisselspanning ontstaat in de omvormer en door de opbouw (laagfrequent wisselspanning van 300 Hz) het schakelen van de halfgeleiders (hoogfrequent schakelpieken op de spanning) van de omvormer;
- In de omvormer worden ferrietkralen toegepast in het laagdoorlaatfilter om de transiënten, veroorzaakt door het schakelen, tegen te houden;
- Aan de AC-zijde van de omvormer worden kabels met een aardscherm toegepast voor de elektrische veiligheid. Door dit kabeltype met scherm te gebruiken, worden ook eventuele storingen vanuit de AC-voeding afgeschermd. Tevens zijn de kabels uit één stuk gemaakt, om slechte verbindingen (moffen/connectoren) te voorkomen. Doordat de kabel uit één stuk is, is de EMC-afscherming ook beter;
- Metalen gestellen van de FPV zijn vereffend en aangesloten op het aardsysteem van de FPV.

8 ZWEMWATERVEILIGHEID

De foutstromen van de twee *worst case* foutscenario's, die bepaald zijn op basis van de referentieontwerpen, zijn gebruikt voor het bepalen van de minimale veilige afstand voor zwemmers. De uitgebreide analyse is te vinden in Appendix D tot en met Appendix G. De analyse bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Veiligheidscriteria. Op basis van zowel de NEN 1010 als vakliteratuur over zwemwaterveiligheid zijn twee criteria bepaald. Het eerste criterium gerelateerd aan NEN 1010 gaat uit van een elektrisch veld in het water op basis van fysiek contact met de stroombron en zal leiden tot een grotere veilige afstand. Het tweede criterium gaat uit van een maximaal elektrisch veld in het water voor een zwemmende persoon op basis van de literatuur waarbij de waarde dichtbij de kritische waarde ligt wat betreft zwemwaterveiligheid.
2. Ontwikkeling numeriek model. In het simulatieprogramma zijn middels de eindige-elementenmethode numerieke modellen van een volwassene en een kind gemaakt en gekalibreerd om verdrinking vanwege een elektrische schok te kunnen onderzoeken.
3. Foutscenario's. De referentieontwerpen behorende bij de twee gekozen foutscenario's zijn in de simulatiesoftware geconstrueerd.
4. Minimale veilige afstand. Voor beide veiligheidscriteria en beide foutscenario's is bepaald wat de minimale veilige afstand voor een volwassene en een kind is. Voor een kind is de minimale veilige afstand een paar procent kleiner dan voor een volwassene. De minimale veilige afstand is groter voor zoet water dan voor brak en zout water. De minimale veilige afstand in zoet water voor het eerste criterium is 36 m en 19 m voor het tweede criterium. Voor zout water is de minimale veilige afstand 13 m voor het eerste criterium en 10 m voor het tweede criterium.

Wij adviseren om de minimale veilige afstand te bepalen op basis van het eerste criterium omdat de waarde van het tweede criterium vrij dicht bij de gevaarlijke waarde ligt. Deze keuze is de meeste conservatieve keuze van de twee

opties. Om een minimale veilige afstand te bepalen voor alle mogelijke personen (geslacht, lengte, breedte, leeftijd, gezondheid, gewicht, BMI, etc.) raden wij aan om 10% toe te voegen aan de berekende de minimale veilige afstand. De geadviseerde minimale veilige afstand bedraagt daarmee 40 meter.

Indien er werkzaamheden in het water binnen de minimale veilige afstand uitgevoerd moeten worden, zal een risicobeoordeling en veiligheidsplan betreffende zwemwaterveiligheid gemaakt dienen te worden.

9 REFERENTIES

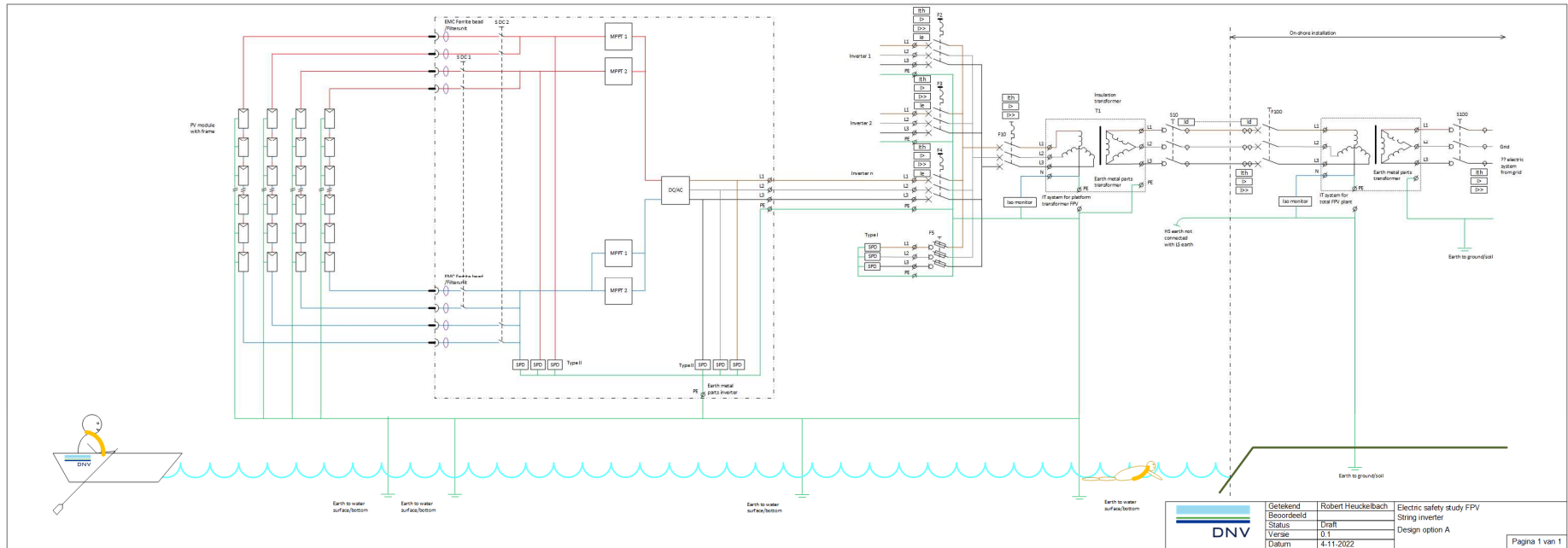
- /1/ NEN 1010:2020 Elektrische installaties voor laagspanning, Nederlandse implementatie van de HD-IEC 60364-reeks;
- /2/ DNV, Achtergrond van eisen aan EMC bij drijvende zonneparken, Arnhem, rapportnummer 23-0682, 26 april 2023.
- /3/ Stray Current DC Corrosion Blind Spots Inherent to Large PV Systems Fault Detection Mechanisms: Elaboration of a Novel Concept;
- /4/ ProRail, OVS 00085 EVSA;
- /5/ TNO 2021 R11261, Verkenning veiligheid zwemmers bij drijvende zonneparken Veiligheid zonneparken langs infra en op water – rapport 5, 4 oktober 2021;
- /6/ DNV, Kaders en richtlijnen – Elektrische zwemwaterveiligheid en EMC, Arnhem, rapportnummer 23-0687, 26 april 2023.
- /7/ NEN 1010, Elektrische installaties voor laagspanning, Nederlandse implementatie van de HD-IEC 60364-reeks, okt 2015.
- /8/ NEN-EN 50522, Aarding van krachtinstallaties boven 1 kV AC, nov 2010.
- /9/ IEC 60479-1, Effecten van stroom op mensen en vee - Deel 1: Algemene aspecten, dec 2018.
- /10/ G S Cargill III, Elektrische schok verdrinking: Causes and Prevention, ResearchGate, Rev. 1, ISBN 10: 154 533 0077, Sept 2017.
- /11/ ABB Bulletin, Electric Shock in Presence of Water, new.abb.com/low-voltage, Doc No 9AKK107992A404036, Rev A, 18 Jun 2021.
- /12/ IEC 60479-1, Effecten van stroom op mensen en vee - Deel 1: Algemene aspecten, Editie 1.0, Dec 2018.
- /13/ EPRI, AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above, 3rd Edition, Red Book, Dec 2005.
- /14/ NEN EN 50522, Aarding van Hoogspanningsinstallaties van Meer dan 1 kV Wisselspanning, nov 2010.
- /15/ M Rosa-Clot, G M Tina, Submerged and Floating Photovoltaic Systems - Modelling, Design and Case Studies, ISBN 978-0-12-812149-8, 2018.
- /16/ D Poljak, A Peratta, C A Brebbia, A 3D BEM Modelling of Human Exposure to Extremely Low Frequency (ELF) Electric Fields, Transactions on Modelling and Simulation, Vol 39, WIT Press, ISSN 1743-355X (online), 2005.
- /17/ M Morse, J Kotsch, B Prussak, J G Kohl, Examining the Risk of Electric Shock Drowning (ESD) As a Function of Water Conductivity, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 56, No 4, Jul / Aug 2020.

- /18/ A W, Smoot, C A, Bentel, Electric Shock Hazard of Underwater Swimming Pool Lighting Fixtures, Paper 64 - 12, Presented at the IEEE Winter Power Meeting, New York, NY, 2 - 7 February 1964.
- /19/ J Ko, H L Cha, D K S Kim, J R Lim, G G Kim, B G Bhang, C S Won, H S Jung, D H Kang, H K Ahn, Safety Analysis of Grounding Resistance with Depth of Water for Floating PVs, Energies, Vol 10, 1304, 2017.
- /20/ <https://www.seatemperature.org/europe/netherlands/amsterdam.htm>, Laatst toegankelijk op 14 nov 2022.
- /21/ <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>, laatst bekeken op 5 dec 2022.
- /22/ E-mailcorrespondentie met: support@geologischdienst.nl , 7 dec 2022, 02:03 PM.

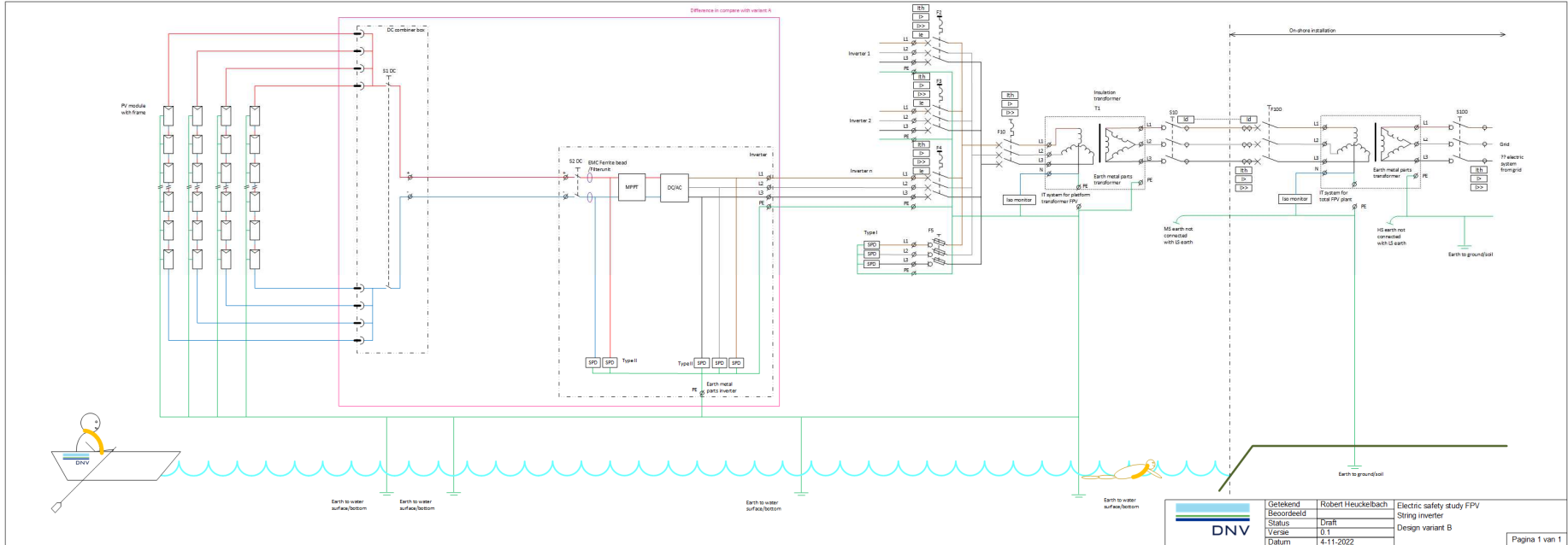
APPENDIX A

Single line diagrammen van varianten van het referentiesysteem

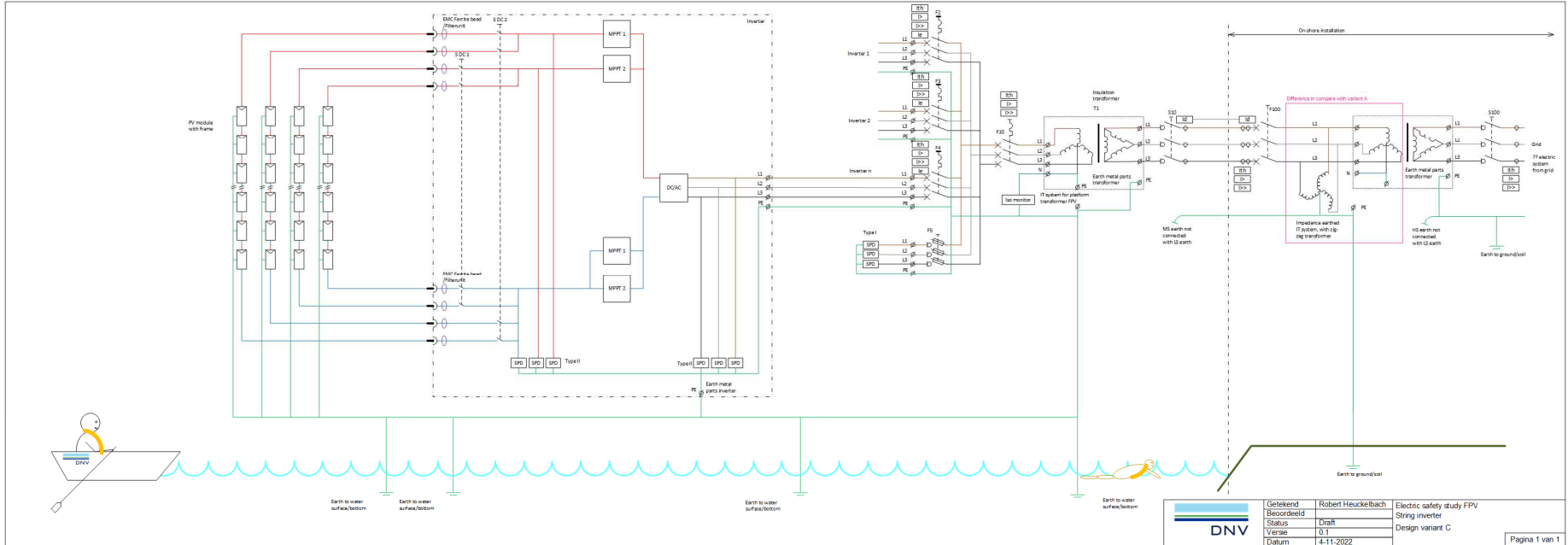
Variant A



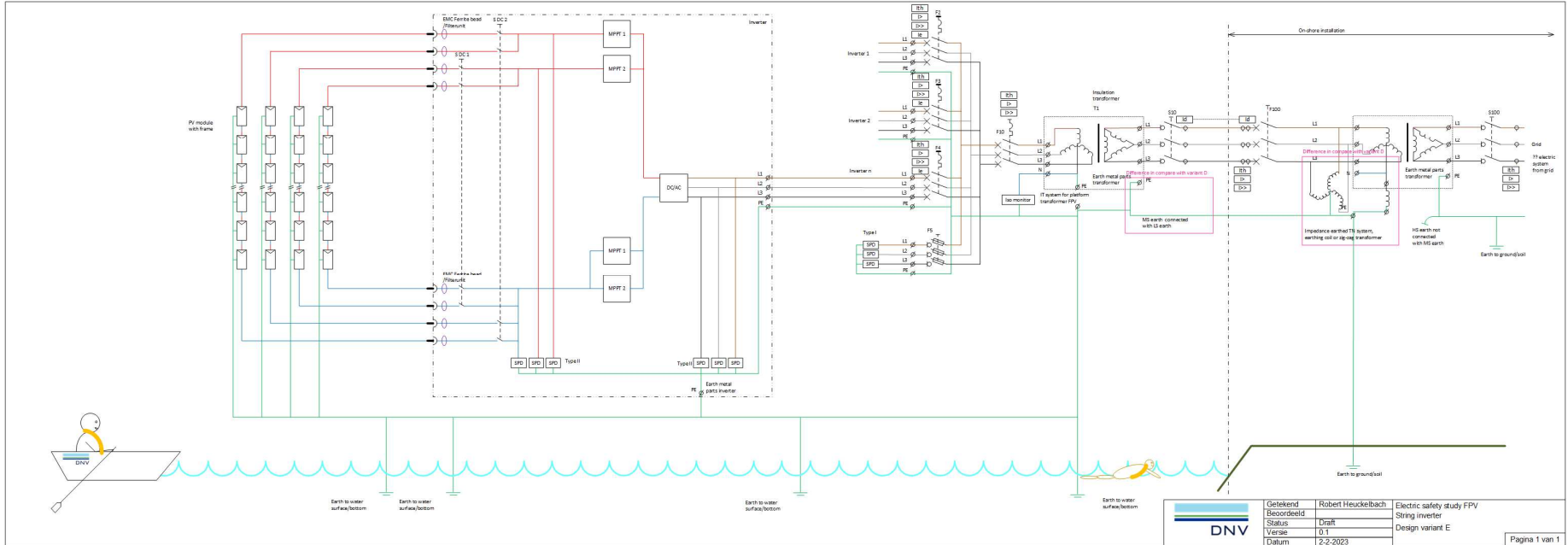
Variant B



Variant C

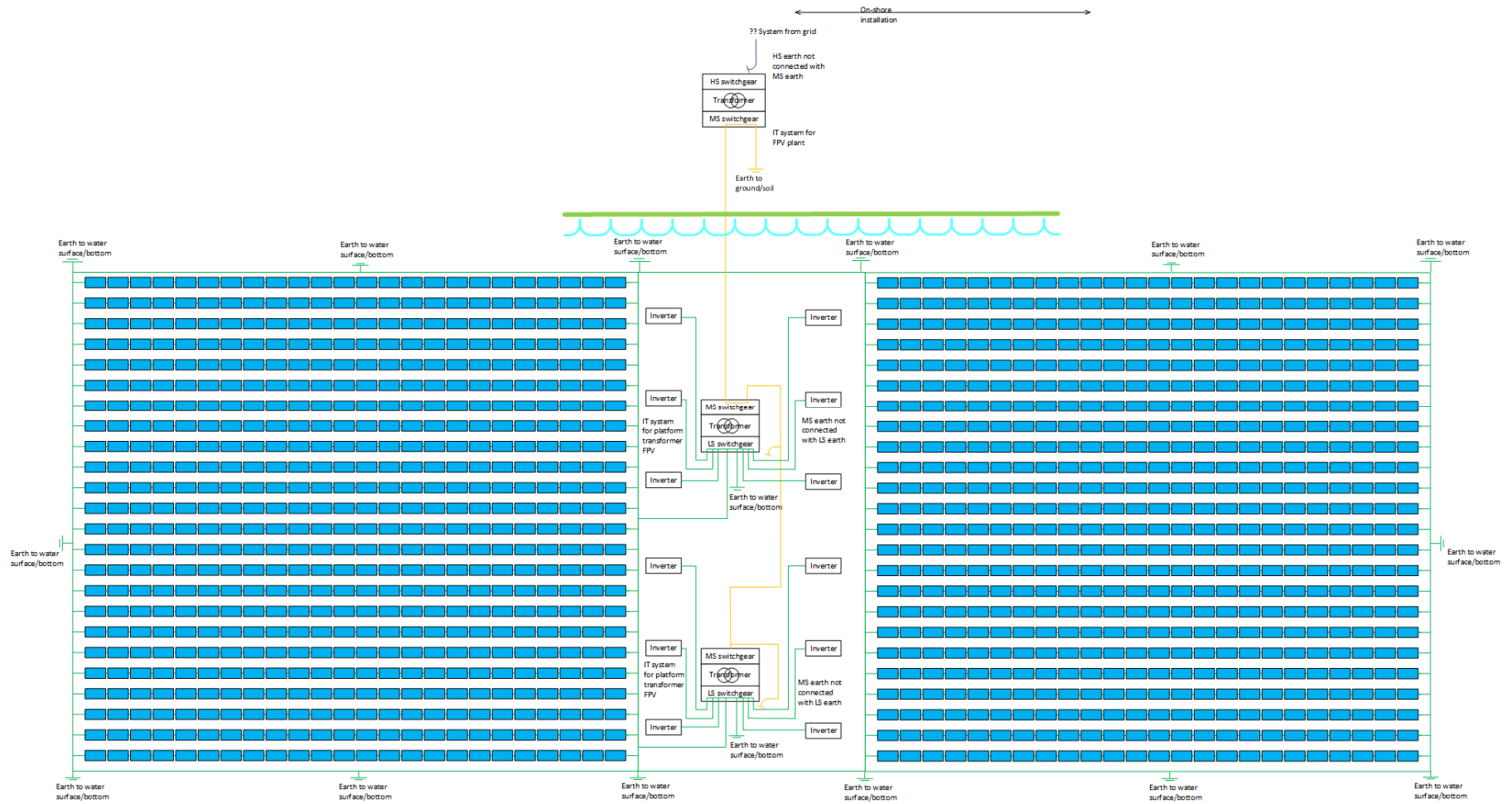


Variant E



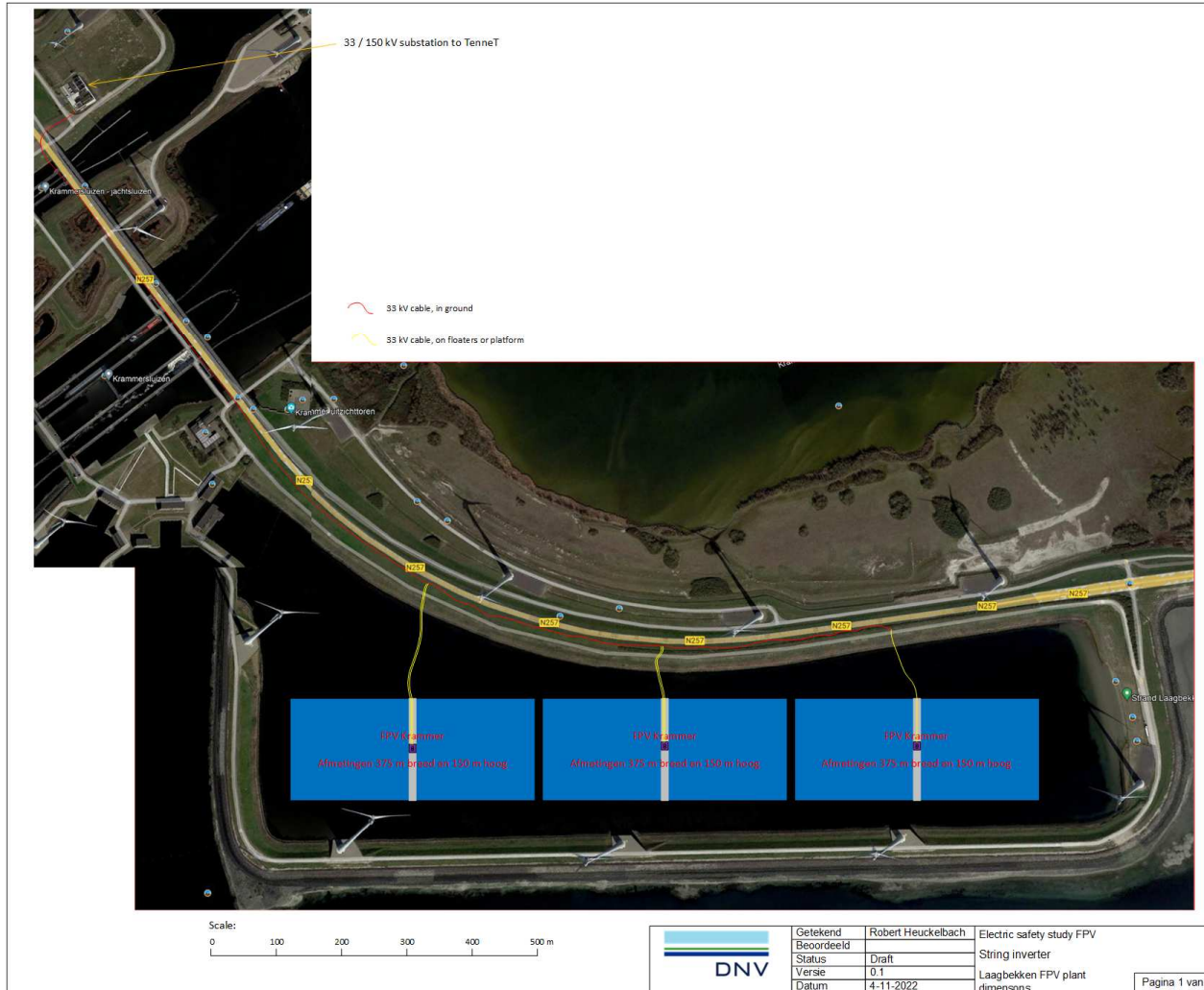
APPENDIX B

Single line diagram van één drijvend PV-veld



APPENDIX C

Concepttekening van een drijvend zonnepark op het Laagbekken van de Krammer



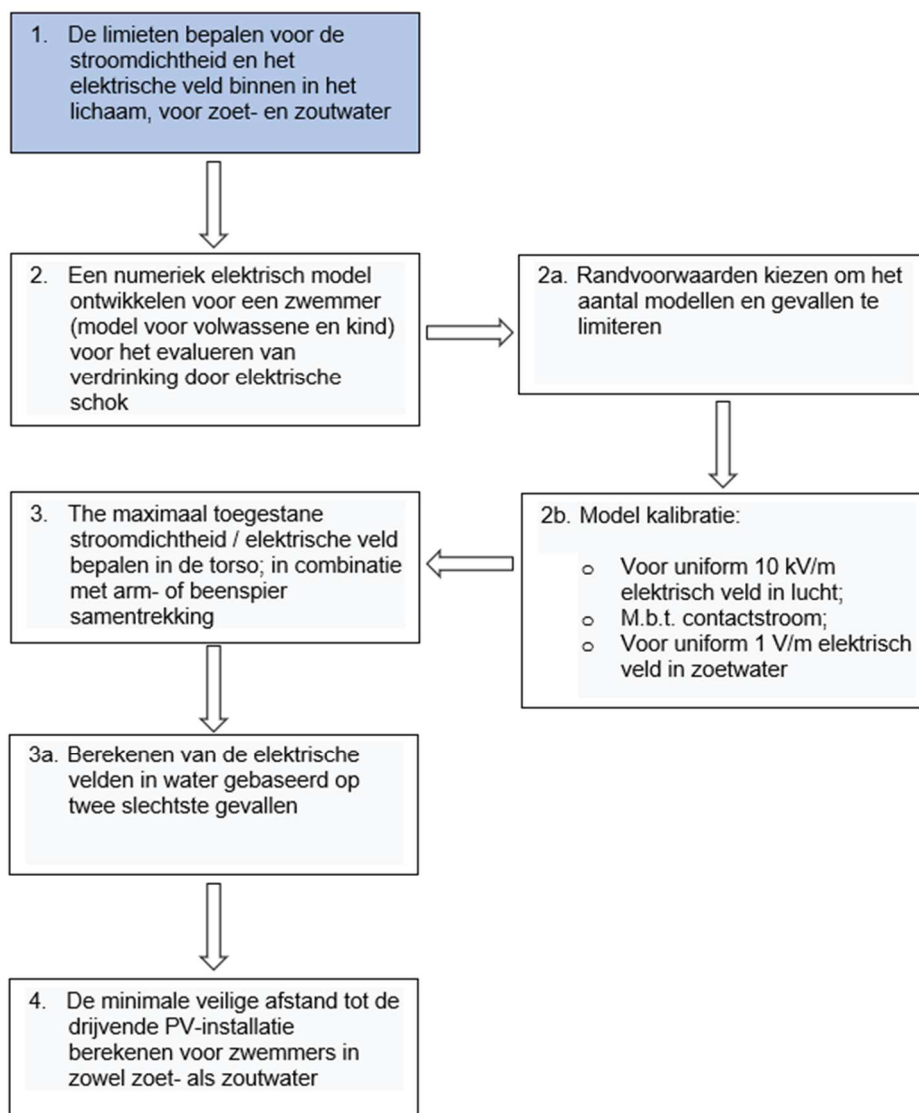
APPENDIX D

Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 1: Veiligheidscriteria

D-1 VEILIGHEIDSCRITERIA

D-1.1 Inleiding

Onder verwijzing naar Figuur 11 werden in dit deel van de studie de criteria voor de veiligheid van zwemmers behandeld, zoals weergegeven in Figuur 12. De grenswaarden voor zowel de stroomdichtheid in het lichaam als het elektrische veld in het lichaam, in de context van verschillende wateromstandigheden: zoet water, brak water en zoutwater, werden in dit deel in aanmerking genomen.



Figuur 12 Dit deel van de studie had betrekking op de criteria voor de veiligheid van zwemmers.

Met het Bouwbesluit 2012 als uitgangspunt: Gelet op de eisen uit het Bouwbesluit 2012, namelijk dat wanneer NEN 1010 voor de veiligheid niet wordt toegepast, een gelijkwaardige oplossing mag worden voorgesteld, wordt in deze

paragraaf een tweeledige aanpak gehanteerd bij het voorstellen van veiligheidscriteria voor het onderzoek. Prong 1 heeft betrekking op normen (NEN 1010 en NEN EN 50522) terwijl Prong 2 betrekking heeft op veiligheidscriteria verkregen uit gepubliceerde literatuur.

D-2 NEN 1010 Criteria (Prong 1)

D-2.1 Fragmenten uit NEN 1010

Samengevat wordt uit NEN 1010 /5/ het volgende opgemerkt:

- "Voor laagspanningsinstallaties, -systemen en -apparatuur komt de beveiliging tegen storingen gewoonlijk overeen met de bescherming tegen indirect contact, met name wat betreft defecten in de basisisolatie van de installatie door personen of vee.

Deze bescherming kan op een van de volgende manieren worden verkregen:

- Voorkomen dat een foutstroom door het lichaam van een persoon of vee loopt" (dit kan niet worden bereikt in het kader van de veiligheid van zwemmers);
- "Het beperken van de omvang van een foutstroom die door een lichaam kan vloeien tot een ongevaarlijk niveau" (Het niveau van de foutstroom zal worden beschouwd in de context van de veiligheid van de zwemmer);
- "Het beperken van de tijd dat een foutstroom door een lichaam kan stromen tot een ongevaarlijke lengte" (De tijdsduur zal worden beschouwd in de context van de veiligheid van zwemmers);
- "In elk deel van een installatie worden een of meer beschermende maatregelen toegepast, rekening houdend met externe invloeden. De volgende beschermingsmaatregelen zijn in het algemeen toegestaan:
 - "automatic power off" (In het geval van de drijvende zonne-installatie schakelt de beveiliging het elektriciteitsnet tijdens een elektrische storing uit om te voldoen aan de geldende storingsvereffeningstijden);
 - "dubbele of versterkte isolatie" (Dit laatste is niet rechtstreeks van toepassing op de veiligheid van zwemmers);
 - "elektrische scheiding van de voeding van één elektrisch apparaat" (Dit laatste is niet rechtstreeks van toepassing op de veiligheid van zwemmers);
 - "extra lage spanning: SELV en PELV" (Beschermingsniveaus in verband met SELF worden in aanmerking genomen, aangezien PELV niet is toegestaan in de hieronder vermelde speciale gevallen);
- "Voor bijzondere installaties of ruimten moeten de beschermingsmaatregelen van hoofdstuk 7 (van NEN 1010) worden toegepast".
- "De Functional Extra Low Voltage (FELV) beperking van de spanning in de SELV- of PELV-keten (bovengrens van de spanningsband) is 50 V AC of 120 V DC"; Sectie 7 kan lagere grenzen invoeren.
- Uit hoofdstuk 7, "In de zones 0 (de waterzone) en 1 van zwembaden en zones in natuurlijk water, zwembaden in grindgaten en kustgebieden en soortgelijke zones is alleen bescherming toegestaan door SELV-circuits met een nominale spanning van ten minste maximaal 12 V AC of 30 V DC (PELV is niet toegestaan)". Deze laatste waarden zullen worden gebruikt als input voor de veiligheidsanalyse.

D-2.2 Afleiding van veiligheidscriteria op basis van NEN 1010

Uit Tabel B-2 in NEN 50522 /6/ blijkt dat de totale menselijke lichaamsimpedantie gerelateerd aan de aanraakspanning voor een stroombaan van hand tot hand, 50 Hz wisselstroom en in totaal 25 V 3250 Ω bedraagt (voor 50% van de bevolking) onder droge omstandigheden.

Uit Tabel 20 in IEC 60479-1 /7/ blijkt dat de totale lichaamsweerstand voor een stroombaan van hand tot hand, gelijkstroom, voor grote contactoppervlakken in droge omstandigheden bij 25 V 3875 Ω bedraagt (voor 50 % van de populatie).

De AC lichaamsimpedantie is iets hoger dan de DC weerstand bij 25 V.

Zowel NEN 50522 als IEC 60479 laten zien dat hogere spanningen gepaard gaan met lagere lichaamsimpedanties.

Gezien de maximale SELV-spanningsniveaus overeenkomstig met hoofdstuk 7 (waterzones, zoals hierboven vermeld), namelijk maximaal 12 V AC en 30 V DC, werden de AC lichaamsimpedantie van 3250 Ω en de totale DC-lichaamsweerstand van 3875 Ω conservatief gekozen als lichaamsimpedanties en als input voor de afleiding van de criteria.

Uit de wet van Ohm werden de volgende stromen berekend:

- $I_{AC} = 12 \text{ V} / 3250 \text{ } \Omega = 3 \text{ mA}$;
- $I_{DC} = 30 \text{ V} / 3878 \text{ } \Omega = 8 \text{ mA}$;

Uit bovenstaande berekening volgen de volgende veiligheidscriteria voor contactstroom, namelijk stroom die door de mens gaat (van hand tot hand en gebaseerd op NEN 1010 (SELV)): 3 mA (AC) en 8 mA (DC).

Het volgende wordt opgemerkt:

- Omdat een zwemmer volledig onder water kan zijn, kan het elektrische contact door het hele lichaam gaan en is contactstroom, zoals hierboven vermeld, niet noodzakelijk van toepassing. Daarom zullen de veiligheidscriteria gebaseerd zijn op elektrisch contact met een groter oppervlak van het lichaam.
- Uit bovenstaande NEN 1010 (SELV) criteria blijkt dat, zoals verwacht, het AC-geval het gevoeliger geval is. Met andere woorden, voor hetzelfde stroomniveau kan worden gesteld dat als het veilig is voor wisselstroom, het ook veilig is voor gelijkstroom.

D-3 NEN EN 50522 Criteria (Prong 1)

D-3.1 Uittreksel uit NEN EN 50522

Samenvattend wordt het volgende opgemerkt uit NEN EN 50522 (2010) /12/:

- "Voor de berekening van toelaatbare waarden van aanraakspanningen voor hoogspanningsinstallaties is uitgegaan van de volgende veronderstellingen:
 - Het huidige pad is van één hand naar beide voeten;
 - De 50 % waarschijnlijkheid van de lichaamsimpedantie wordt gebruikt;
 - De 5 % kans op ventriculaire fibrillatie wordt gebruikt en
 - Er werden geen extra weerstanden overwogen".

"OPMERKING: Deze veronderstellingen leiden tot een aanraakspanningscurve met een geschat risico als gevolg van ervaring, specifiek opgeleid personeel, betwistbare kosten enz. die aanvaardbaar is in geval van aardfouten in hoogspanningsinstallaties".

"Ervan uitgaande dat IEC 60479-1 /7/ de basis vormt voor de berekening van de lichaamsstroom en rekening houdend met curve c2 van Figuur 20 en Tabel 21 van IEC/TS 60479-1 /7/ (kans op ventriculaire fibrillatie minder dan 5%, stroompad van linkerhand naar beide voeten) als toelaatbare stroomgrens, resulteert de volgende Tabel 1":

Tabel 1 Toelaatbare lichaamsstroom I_b afhankelijk van de storingsduur t_f /7/.

Foutstroomtijd (s)	Lichaamsstroom (mA)
0,05	900
0,10	750
0,20	600
0,50	200
1,00	80

2,00	60
5,00	51
10,00	50

Uitgaande van het "safe let-go"-stroomniveau van 5 mA /11/, de 10 s durende foutstroom uit Tabel 1 is 50 mA, een factor 10 hoger dan de "safe let-go"-stroom.

Om de veilige lichaamsstroom flexibel te kunnen toepassen (schalen), zijn kalibratieberekeningen uitgevoerd voor een lichaamsstroom van 1 mA.

D-4 Veiligheidscriteria uit gepubliceerde literatuur (Prong 2)

Carghill (2017) /8/, rapporteerde over metingen van de weerstand van de menselijke romp die werden uitgevoerd (in 1964) door het onderlichaam en het bovenlichaam (maar niet de romp) van een persoon onder te dompelen in afzonderlijke omhulsels met zout water en door 5 mA stroom door de rompstreep te laten lopen, wat spanningen per voet van het lichaam vereiste, oftewel elektrische velden in het lichaam, van 0,69 tot 0,92 V/m /8/.

Hierbij wordt opgemerkt dat een waarde van 6,6 V/m vaak wordt aangenomen als het gevaar voor verdrinking door een elektrische schok (ESD) in het water /8/.

Tabel 2 presenteert de geschatte drempelwaarden voor de stroomdichtheden en elektrische velden van het lichaam voor verschillende fysiologische reacties, zoals geschat door Carghill (2017) /8/.

Tabel 3 presenteert de minimale elektrische velden en stroomdichtheden in het water voor verschillende fysiologische reacties, voor boven-naar-beneden oriëntatie in meren en voor-naar-achter oriëntatie in zeewater, zoals gerapporteerd door Carghill (2017) /8/.

Tabel 2 Geschatte drempelwaarden voor lichaamsstroomdichtheden en elektrische velden voor verschillende fysiologische reacties /8/.

Nr.	Reactie	Stroomdichtheid (A/m ²)	Elektrisch veld (V/m)
1	Tintelingen	0,18	1,5
2	Ademhalingsstilstand	0,64	5,3
3	Spierflexie	1,0	8,3
4	Ventriculaire Fibrillatie	4,0	33

Tabel 3 Minimum elektrische velden en stroomdichtheden in het water voor verschillende fysiologische reacties, voor boven-naar-beneden oriëntaties in meren en van voor-naar-achter in zeewater /8/.

Nr.	Antwoord	Lichaamsstroom Dichtheid (A/m ²)	Zoet water (0,1 S/m)		Zeewater (5,5 S/m)	
			Stroomdichtheid (A/m ²)	Elektrisch veld (V/m)	Stroomdichtheid (A/m ²)	Elektrisch veld (V/m)
1	Tintelingen	0,18	0,145	1,5	3,7	0,67
2	Ademhalingsstilstand	0,64	0,54	5,4	13,1	2,4
3	Spierflexie	1,0	0,84	8,4	20	3,7
4	Ventriculaire Fibrillatie	4,0	3,4	34	82	15

De gegevens in de Tabellen 1 en 2 zullen worden gebruikt als input voor de veiligheidsanalyse.

D-5 Duurcriteria met betrekking tot de veiligheid van zwemmers

D-5.1 Basis voor de keuze van de huidige drempelwaarde

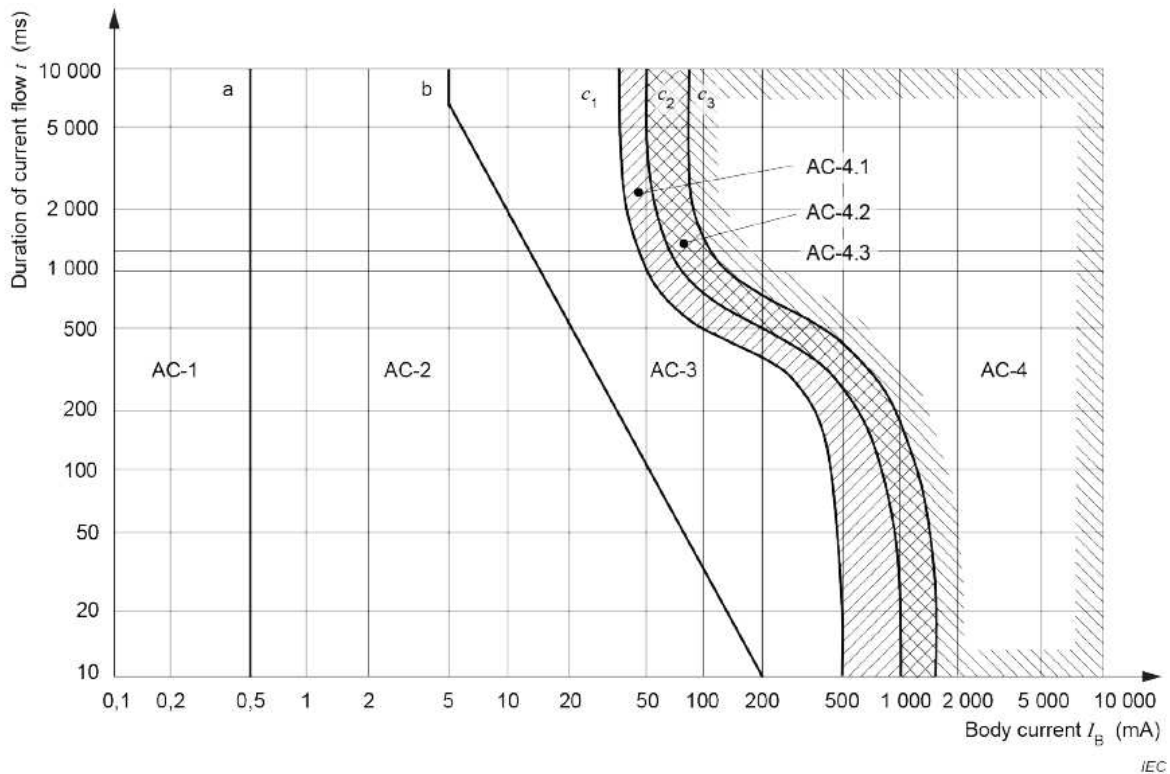
Pathologische, dodelijke effecten van elektriciteit (bijvoorbeeld tetanische contractie, ademhalingsverlamming, ventriculaire fibrillatie) kunnen optreden bij lagere stromen dan bij gewone elektrische schokken. Als het watervolume groot genoeg is (bijvoorbeeld een zee, een meer of een zwembad), kan de elektrische schok, ook al is deze op zich niet dodelijk, verlies van controle over de spieren veroorzaken en leiden tot de dood door verdrinking /9/. Daarom werden de ontwikkelde veiligheidscriteria afgezet tegen de waarde van de wisselstroom/gelijkstroom die geen enkele spiercontractie veroorzaakt of daarmee in verband staat.

D-5.2 Selectie van de AC-stroomdrempel

Tabel 4 toont de tijd en stroomzones voor AC 15 Hz tot 100 Hz voor de stroombaan van hand naar voeten met een samenvatting in Figuur 13, overeenkomstig met IEC standaard 60479-1 /10/. Uit Figuur 13 en Tabel 4 blijkt dat een AC-drempelwaarde van 0,5 mA van toepassing is op de stroomzone die verband houdt met mogelijke spiercontractie.

Tabel 4 Tijd en stroomzones voor AC 15 Hz tot 100 Hz voor de stroombaan van hand tot voet met een samenvatting in Figuur 13 overeenkomstig met IEC 60479-1 /10/.

Zones	Boundaries	Physiological effects
AC-1	Up to 0,5 mA curve a	Perception possible but usually no 'startled' reaction.
AC-2	0,5 mA up to curve b	Perception and involuntary muscular contractions likely but usually no harmful electrical physiological effects.
AC-3	Curve b and above	Strong involuntary muscular contractions. Difficulty in breathing. Reversible disturbances of heart function. Immobilization may occur. Effects increasing with current magnitude. Usually no organic damage to be expected.
AC-4 ^a	Above curve c_1 c_1 - c_2 c_2 - c_3 Beyond curve c_3	Patho-physiological effects may occur such as cardiac arrest, breathing arrest, and burns or other cellular damage. Probability of ventricular fibrillation increasing with current magnitude and time. AC-4.1 Probability of ventricular fibrillation increasing up to about 5 %. AC-4.2 Probability of ventricular fibrillation up to about 50 %. AC-4.3 Probability of ventricular fibrillation above 50 %.
^a For durations of current flow below 200 ms, ventricular fibrillation is only initiated within the vulnerable period if the relevant thresholds are surpassed. As regards ventricular fibrillation, Figure 20 relates to the effects of current which flows in the path left hand to feet. For other current paths, the heart current factor has to be considered.		



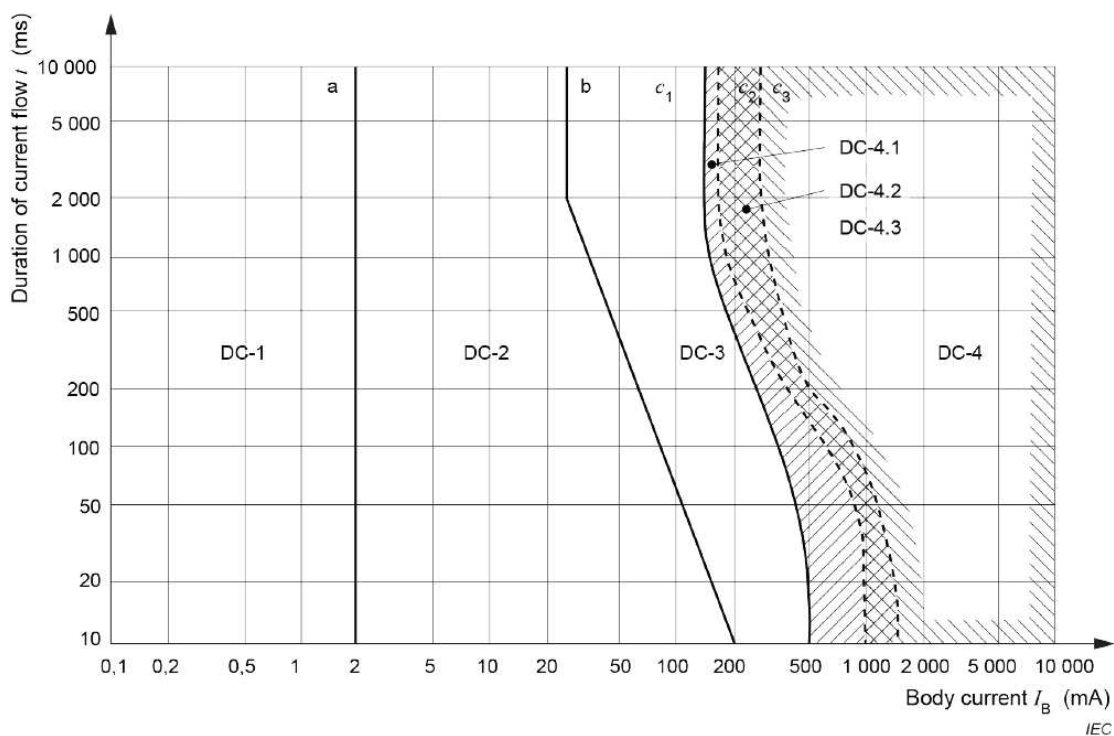
Figuur 13 Overzicht van tijd en stroomzones voor AC 15 Hz tot 100 Hz voor de stroombaan van hand tot voet volgens IEC standaard 60479-1 /10/.

D-5.3 Selectie DC-stroomdrempel

Tabel 5 toont de tijd en stroomzones voor de DC-stroombaan van hand naar voeten met een samenvatting in Figuur 14, overeenkomstig met IEC standaard 60479-1 /10/. Uit Figuur 14 en Tabel 5 blijkt dat een DC-drempelwaarde van 2 mA van toepassing is op de stroomzone die verband houdt met mogelijke spiercontractie.

Tabel 5 Tijd en stroomzones voor de DC-stroombaan van hand tot voet met een samenvatting in Figuur 14, overeenkomstig met IEC standaard 60479-1 /10/.

Zones	Boundaries	Physiological effects
DC-1	Up to 2 mA curve a	Slight pricking sensation possible when making, breaking or rapidly altering current flow.
DC-2	2 mA up to curve b	Involuntary muscular contractions likely especially when making, breaking or rapidly altering current flow but usually no harmful electrical physiological effects.
DC-3	Curve b and above	Strong involuntary muscular reactions and reversible disturbances of formation and conduction of impulses in the heart may occur, increasing with current magnitude and time. Usually no organic damage to be expected.
DC-4 ^a	Above curve c_1 c_1-c_2 c_2-c_3 Beyond curve c_3	Patho-physiological effects may occur such as cardiac arrest, breathing arrest, and burns or other cellular damage. Probability of ventricular fibrillation increasing with current magnitude and time. DC-4.1 Probability of ventricular fibrillation increasing up to about 5 %. DC-4.2 Probability of ventricular fibrillation up to about 50 %. DC-4.3 Probability of ventricular fibrillation above 50 %.
^a For durations of current flow below 200 ms, ventricular fibrillation is only initiated within the vulnerable period if the relevant thresholds are surpassed. As regards ventricular fibrillation, Figure 22 relates to the effects of current which flows in the path left hand to feet and for an upward current. For other current paths the heart current factor has to be considered.		



Figuur 14 Overzicht van tijd en stroomzones voor de DC-stroombaan van hand tot voet volgens IEC standaard 60479-1 /10/.

D-5.4 Stroomdrempel kalibratie

Er is opgemerkt dat het geval van wisselstroom gevoeliger is en daarom zal de nadruk liggen op wisselstroom (want als het veilig is voor wisselstroom, zal het ook veilig zijn voor gelijkstroom).

De AC-drempel van 0,5 mA, een contactstroomniveau, zal worden gebruikt als veiligheids criterium zonder tijdsverband ("fault clearing time"). Er is opgemerkt dat dit niveau van $\leq 0,5$ mA (voor geen spiercontractie) een factor 10 lager is dan de "safe-let-go"-stroom van 5 mA bij spiercontractie, zoals voorgesteld in /11/.

Om de contactstroom van 0,5 mA (van hand tot voet) af te stemmen op / te koppelen aan de contactstroom van het volledig ondergedompelde lichaam, wordt de modelkalibratie uitgevoerd zoals besproken in Appendix E.

D-6 Veiligheidscriteria gebruikt bij het onderzoek

D-6.1 Criterium 1 – Op basis van contactstroom

De volgende veiligheids criteria werden in de studie toegepast op basis van een kalibratie van het menselijke model.

Met deze aanpak is geprobeerd een veilig elektrisch veld in zoet water af te leiden op basis van de kalibratie van het model voor volwassenen tot een veilige (0,5 mA) contactstroom die geen spiercontractie zal veroorzaken.

Beginnend met de AC, de bevindingen van Carghill (2017) /8/ als referentie voor ademhalingsstilstand; deze laatste moet worden aangepast aan een elektrisch veld referentieniveau in water van 1 V/m; vervolgens dient de vraag te worden beantwoord over i) welke lichaamsstroombichtheid wordt vertegenwoordigd door een 0,5 mA (hand-tot-voet contactstroom en ii) welk elektrisch veld niveau in water is representatief voor deze laatste stroomdichtheid? Een samenvatting staat in Tabel 6.

Uit Tabel 6 worden de volgende vragen beantwoord:

- Welke gemiddelde stroomdichtheid in het lichaam wordt vertegenwoordigd door een contactstroom van 0,5 m (hand-tot-voet)? Antwoord: $1,45 \times 10^4$ nA/cm² (Zie regel 4 in Tabel 6).
- Welk niveau van elektrisch veld in het water is representatief voor de voorgaande stroomdichtheid in het lichaam? Antwoord: 0,76 V/m (zie regel 6 in Tabel 6).

Als veiligheids criterium 1 zal bij de veiligheidsbeoordeling een elektrisch veldniveau in het water van 0,8 V/m worden gehanteerd.

Tabel 6: Minimaal elektrisch veld in het water en minimale stroomdichtheid in het lichaam, gebruikt als veiligheids criterium bij de beoordeling van de veiligheid van zwemmers (van boven naar beneden gericht) in zoet water.

Oorspronkelijke waarden

Nr.	Antwoord / Beschrijving	Lichaamsstroom Dichtheid (A/m ²)	Zoet water (0,1 S/m)	
			Stroomdicht- heid (A/m ²)	Elektrisch veld (V/m)
1	Ademhalingsstilstand - Volgens Tabel 3 (Carghill, 2017) /8/.	0,64	0,54	5,4

Omgezette waarden

Nr.	Antwoord / Beschrijving	Lichaamsstroom Dichtheid (nA/cm ²)	Zoet water (0,1 S/m)	
			Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (V/m)
1	Ademhalingsstilstand - Volgens Tabel 3 (Carghill, 2017) /8/.	$6,40 \times 10^4$	$5,40 \times 10^4$	5,4
2	Ademhalingsstilstand - zoals in Tabel 3 - gerelateerd aan 1 V/m	$1,19 \times 10^4$	$1,00 \times 10^4$	1,0
3	Gemiddelde lichaamsstroom (gebaseerd op gekalibreerde contactstroom van 1,0 mA)	$2,89 \times 10^4$	N/A	N/A
4	Gemiddelde lichaamsstroom (gebaseerd op aangepaste contactstroom van 0,5 mA)	$1,45 \times 10^4$	N/A	N/A
5	Gemiddelde lichaamsstroom (gebaseerd op een gekalibreerd uniform elektrisch veld van 1 V/m in het water)	$1,92 \times 10^4$	N/A	1
6	Gemiddelde lichaamsstroom (gebaseerd op een aangepast uniform elektrisch veld van 0,76 V/m in het water)	$1,45 \times 10^4$	N/A	0,76
7	Gevarenniveau voor ESD /8/	N/A	N/A	6,6
8	Ademhalingsstilstand - Zoals in Tabel 3 met 47% veiligheids- marge	$3,01 \times 10^4$	$2,54 \times 10^4$	2,54

9	Ademhalingsbescherming - 47% veiligheidsniveau - gerelateerd aan 1 V/m	$1,19 \times 10^4$	$1,00 \times 10^4$	1,0
---	--	--------------------	--------------------	-----

D-6.2 Criterium 2 – Op basis van een veiligheidsmarge in de ademhalingsruststroom

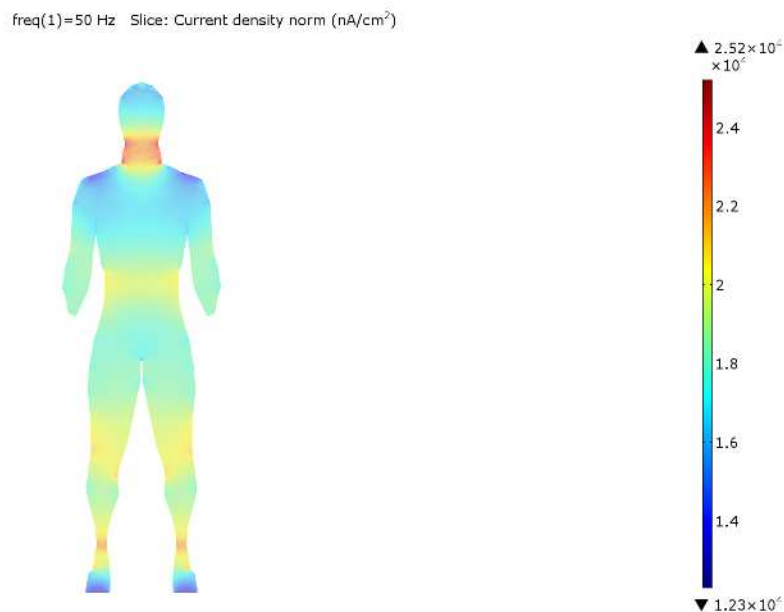
Met deze aanpak is geprobeerd een veilig elektrisch veld in zoet water te ontwikkelen op basis van de invoering van een veiligheidsmarge ten opzichte van het ademhalingsstilstandsniveau dat door Carghill (2017) /8/ werd gerapporteerd.

Het door Carghill /8/ gerapporteerde elektrisch veld in het water voor ademhalingsstilstand bedroeg 5,4 V/m en ligt dicht bij het voor ESD /8/ gerapporteerde gevaarniveau van 6,6 V/m. Het elektrisch veld van 5,4 V/m in het water gaat gepaard met een stroomdichtheid in het lichaam van $6,40 \times 10^4$ nA/cm².

Uit de berekende stroomdichtheid van de in water ondergedompelde volwassene blijkt dat voor een elektrisch veld van 1 V/m in water een maximale stroomdichtheid in het lichaam van $2,52 \times 10^4$ nA/cm² wordt verwacht. Alle geïnduceerde stroomdichtheden in het lichaam (getoond in Figuur 15) vallen onder de door Carghill /8/ gerapporteerde waarde voor de stroomdichtheid bij ademhalingsstilstand ($6,40 \times 10^4$ nA/cm²).

Om het elektrisch veldniveau van 1 V/m (met een stroomdichtheid van $2,52 \times 10^4$ nA/cm²) af te stemmen op dat van Carghill /8/ (met een stroomdichtheid van $6,40 \times 10^4$ nA/cm²) is een aanpassingsfactor nodig van $6,40 \times 10^4$ nA/cm² ÷ $2,52 \times 10^4$ nA/cm² = 2,54. Toepassing van deze aanpassingsfactor op het elektrisch veld in het water levert op: $2,54 \times 1$ V/m = 2,54 V/m. Dit geeft een veiligheidsfactor van $2,54 \div 5,4 = 0,47$ of 47 %.

Als veiligheids criterium 2 zal bij de veiligheidsbeoordeling een elektrisch veldniveau in het water van 2,54 V/m worden gehanteerd.



Figuur 15 Lichaamsstroomdichtheid bij een elektrisch veld van 1 V/m in water (zie Appendix E voor meer details).

D-6.3 Selectie van het criterium

Als veiligheids criterium 1 zal bij de veiligheidsbeoordeling een elektrisch veldniveau in het water van 0,8 V/m worden gehanteerd.

Als veiligheids criterium 2 zal bij de veiligheidsbeoordeling een elektrisch veldniveau in het water van 2,54 V/m worden gehanteerd.



De waarde van 2,54 V/m die wordt voorgesteld als veiligheidsdrempel in zoet water is 47 % van de door Cargill /8/ voorgestelde drempelwaarde voor ademhalingsstilstand (5,4 V/m).

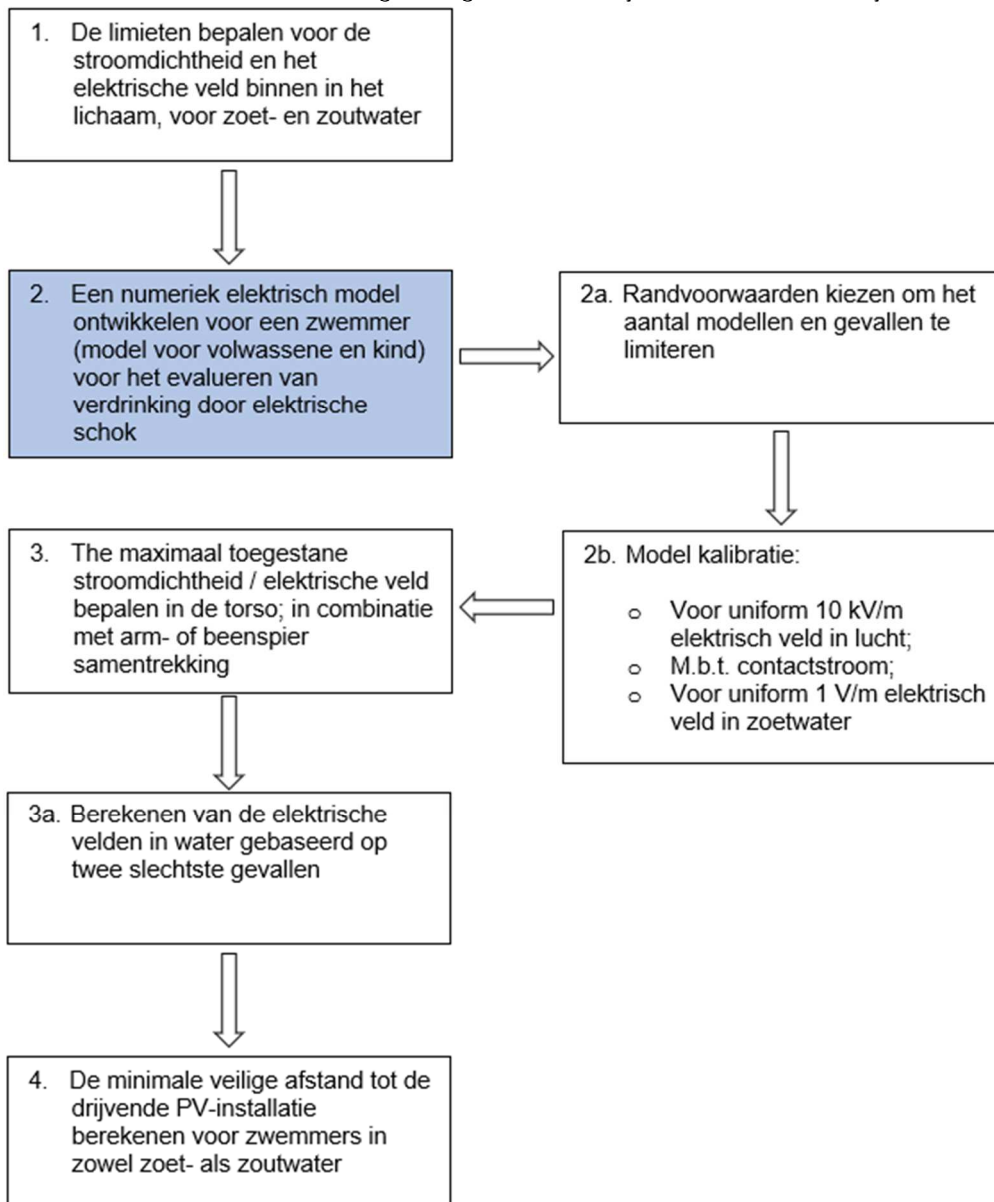
APPENDIX E

Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 2: Numerieke modellen voor zwemmers

E-1 Inleiding

Onder verwijzing naar Figuur 16 zijn in dit deel van de studie de numerieke modellen (modellen voor volwassenen en kinderen) behandeld die zijn ontwikkeld om de veiligheid van zwemmers te beoordelen.

De elektrische stroom die door het water en een ondergedompeld menselijk lichaam loopt, werd geanalyseerd door het menselijk lichaam te behandelen als uniform in geleiding en met een bijna realistische menselijke vorm.

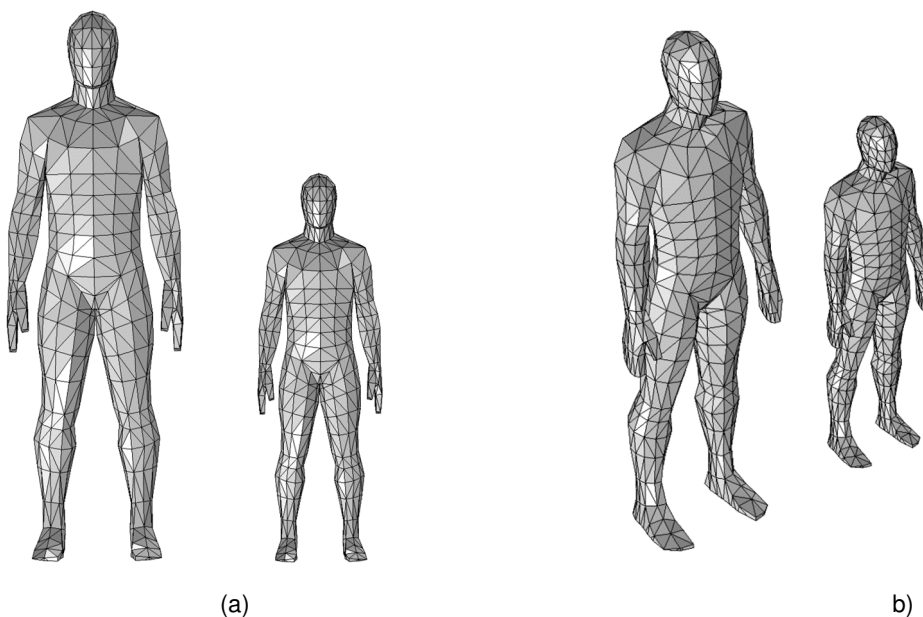


Figuur 16 Dit deel van de studie behandelde de numerieke modellen die zijn ontwikkeld om de veiligheid van zwemmers te beoordelen.

E-2 Procedure

De volgende procedure werd gevolgd:

- De modellen van de “Finite Element Method” (FEM) voor de volwassene en het kind waren respectievelijk 1,72 m en 1,22 m hoog. De modellen waren identiek en werden slechts isometrisch geschaald ten opzichte van het volwassen model om te komen tot het kindmodel, zoals getoond in Figuur 17.
- De geleidbaarheid voor het model werd gekozen op basis van de gemiddelde geleidbaarheid van meer uitgebreide menselijke elektrische modellen.
- Omdat het aantal modellen en gevallen snel toenam, moest het aantal bestudeerde modellen vanwege de beschikbare middelen worden beperkt.



Figuur 17 FEM-modellen voor de volwassene en het kind, die respectievelijk 1,72 m en 1,22 m lang zijn.

- Er is al veel werk verricht voor het bepalen van de geïnduceerde stroomdichtheid van mensen die zijn blootgesteld aan elektrische velden van bovengrondse hoogspanningslijnen. Om het model voor volwassenen te kalibreren, wat betreft het gemiddelde geleidingsvermogen dat voor het model wordt gebruikt en de typische afmetingen van het model, werd het model voor volwassenen gekalibreerd tegen een ongestoord elektrisch veld van 10 kV/m in de lucht.
- Nadat de kalibratie van het model aanvaardbaar was, werd het volwassen model vervolgens in een numeriek model in water ondergedompeld, om de stroomdichtheid en het elektrische veld in het lichaam te bepalen wanneer het in water wordt blootgesteld aan een uniform en een niet-uniform elektrisch veld.
- Ook werd rekening gehouden met de oriëntatie van het elektrische veld ten opzichte van het menselijk lichaam en het model.
- Met de contactstroom als veiligheids criterium en uitgangspunt, waarbij ook werd verwezen naar de genoemde normen (zie Appendix D), werd geprobeerd de contactstroom te relateren aan de stroom bij onderdompeling van het menselijk lichaam in water. Dit bleek een complex probleem te zijn.
- Het uiteindelijke model werd opgesteld met de mens volledig ondergedompeld in water, met een elektrisch referentieveld in het water van 1 V/m dat gemakkelijk naar boven of beneden kan worden geschaald.

- De beoordeling van de stroomdichtheid en het elektrisch veld in het lichaam werd uitgevoerd op verschillende snijvlakken door het lichaam. Deze omvatten een verticaal snijvlak en snijvlakken op: ooghoogte; nekhoogte; rompniveau; bekkenniveau en enkelniveau.

E-3 In het model gebruikte geleidingsvermogens

Voor de studie werden de volgende geleidingen geselecteerd:

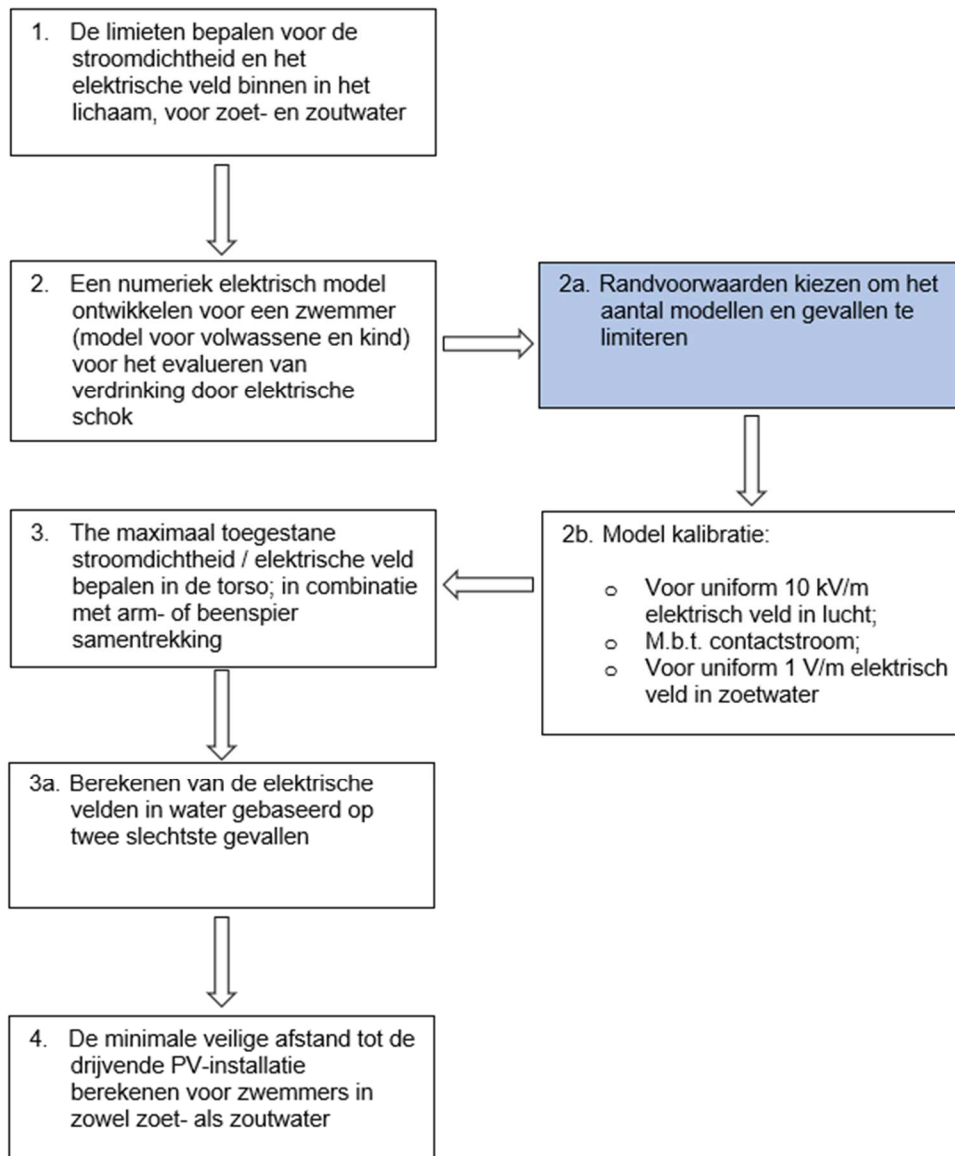
Tabel 7 Geleidingsvermogens die als input voor de studie worden beschouwd.

Nr.	Beschrijving	Gepubliceerde geleidbaarheid (S/m)	Referentie	Geleidingsvermogen geselecteerd voor onderzoek (S/m)
1	Vers water	2×10^{-4} tot 5×10^{-2}	/9/	
		0,01 tot 0,2	/8/	0,1
2	Zee/Zout water	3 tot 6	/9/	
		5,5	/8/	5,5
3	Brak water	0,08 tot 2,56	/15/	
4	Menselijk lichaam	0,1 tot 0,2	/9/	0,21 (zie aanhangsel A)
		0,12	/8/	

Uit Tabel 7 zijn de waarden 0,1 S/m, 5,5 S/m en 0,21 S/m gekozen voor respectievelijk zoet water, zeewater en het menselijk lichaam.

E-4 Randvoorwaarden om het aantal modellen te beperken

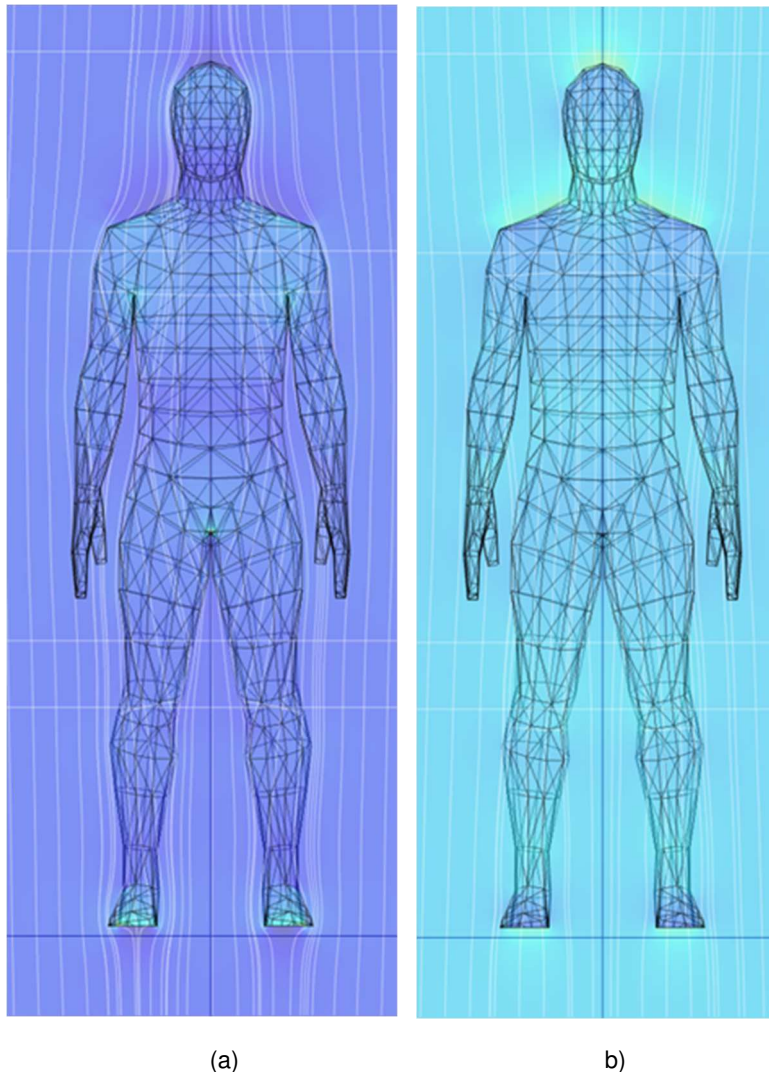
Onder verwijzing naar Figuur 18 werden in dit deel van de studie de randvoorwaarden behandeld om het aantal numerieke modellen te beperken die moesten worden ontwikkeld om de veiligheid van de zwemmer te beoordelen.



Figuur 18 Dit deel van de studie had betrekking op de randvoorwaarden om het aantal numerieke modellen te beperken die moesten worden ontwikkeld om de veiligheid van de zwemmer te beoordelen.

Om de middelen en de tijd die met de studie gemoeid zijn te beperken, werd het volgende overwogen in een poging het aantal modellen en gevallen die in acht diende te worden genomen te beperken:

- Door het verschil in de geleidbaarheid tussen zeewater, het menselijk lichaam en zoet water, heeft het elektrische veld de neiging om in zeewater het lichaam te verlaten en in zoet water het lichaam in te trekken, zoals blijkt uit Figuur 19. Het geval van zoet water is dus het slechtste geval en in de modellen is alleen met zoet water rekening gehouden; als de mens veilig is in zoet water, dan zal hij ook veilig zijn voor brak en zeewater (mits het geleidingsvermogen van het water hoger is dan dat van het menselijke model en *ceteris paribus*). (Zie aanhangsel D voor meer details).



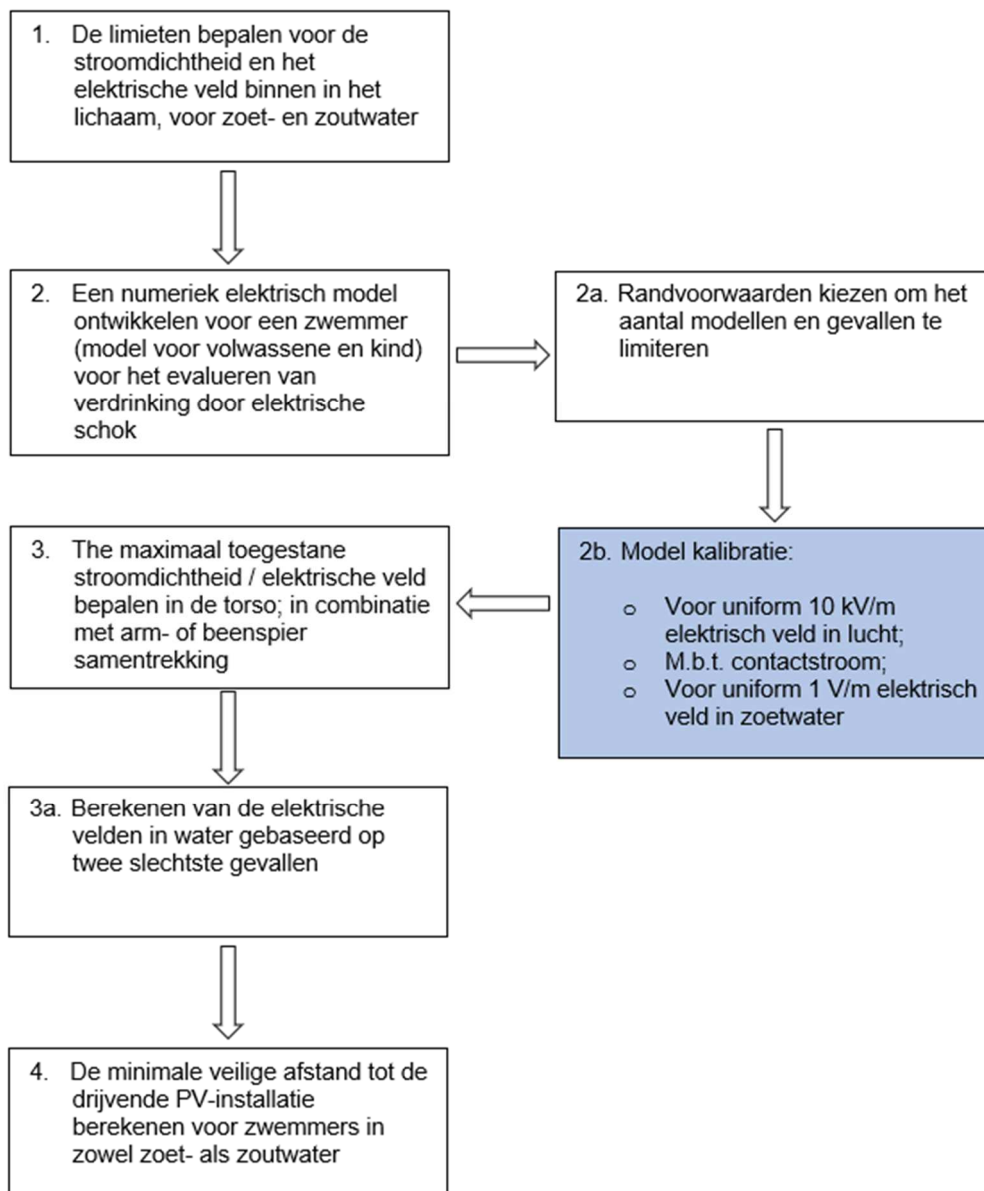
Figuur 19: Het elektrisch veld heeft de neiging om in zeewater het lichaam te verlaten (a) en in zoet water het lichaam binnen te trekken (b).

- De gevallen van ondergedompelde volwassenen en kinderen zijn zeer vergelijkbaar wat betreft de stroomdichtheid in het lichaam in het geval van een uniform elektrisch veld in water (waarbij de stroomdichtheid bij kinderen iets lager is dan bij mensen - zie aanhangsel C voor meer details). Daarom lag de nadruk in het model op volwassenen, dat vervolgens ook bij de veiligheidsbeoordeling werd gebruikt.
- Om de mens bloot te stellen aan een niet-uniform elektrisch veld, moet de mens zich zeer dicht bij de bron van het niet-uniforme elektrisch veld bevinden. Omdat de zwemmer de bron van het elektrisch veld van enige afstand zal benaderen, was de aandacht vooral gericht op het uniforme elektrisch veld (zie punt 14.5.3 voor meer details);
- Als de situatie veilig is voor wisselstroom, dan zal het ook veilig zijn voor gelijkstroom, zoals eerder is aangetoond in Appendix D. Daarom is de studie alleen uitgevoerd voor het geval van wisselstroom.
- Er is gekeken naar de foutstroom in het slechtste geval en er zijn slechts 2 x gevallen (een AC en DC slechtste geval) in acht genomen, om het aantal gemodelleerde foutgevallen te beperken.

E-5 Bevindingen - Modelkalibratie

E-5.1 Algemeen

Onder verwijzing naar Figuur 20, heeft dit deel betrekking op de kalibratie van de numerieke modellen die worden gebruikt om de veiligheid van zwemmers te beoordelen.



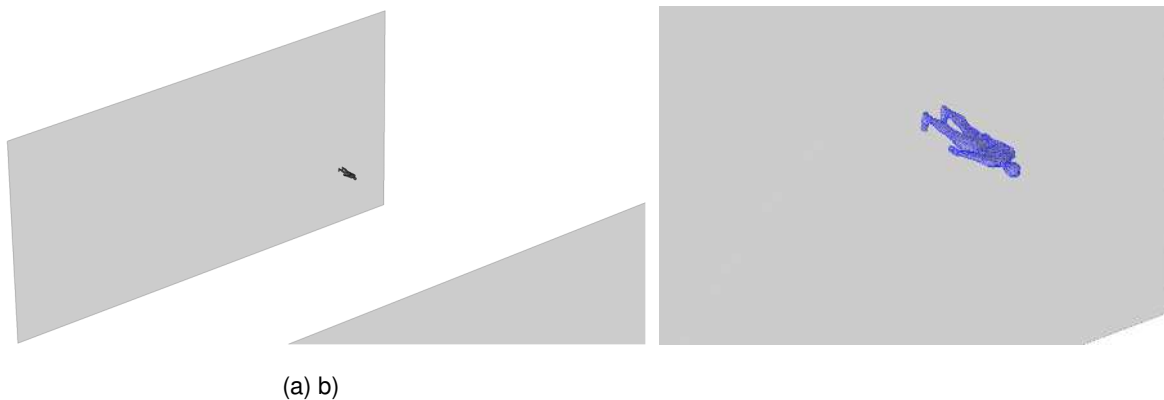
Figuur 20 Dit deel van de studie had betrekking op de kalibratie van de numerieke modellen die worden gebruikt om de veiligheid van zwemmers te beoordelen.

E-5.2 Ondergedompeld menselijk model in een uniform elektrisch veld

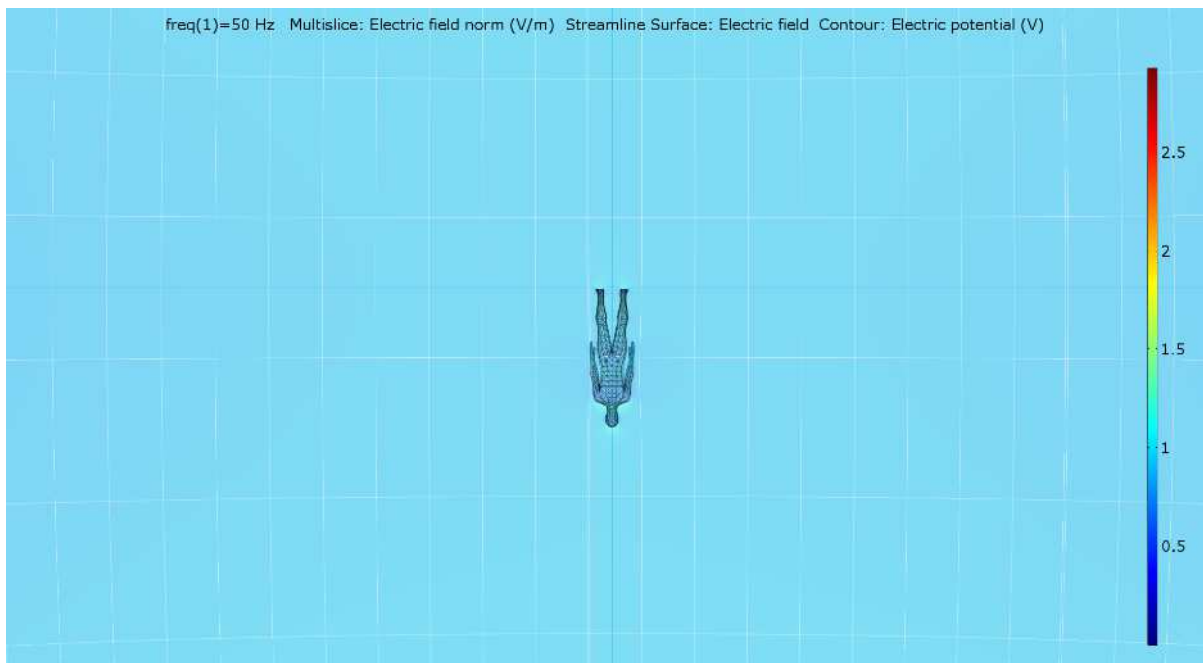
Voor de beoordeling met betrekking tot het uniform elektrisch veld werd het volgende toegepast:

- De bovenkant van de rug van de zwemmer lag 200 mm onder het wateroppervlak;
- De verticale platen (zie Figuur 21) in het model werden bekrachtigd om een uniform elektrisch veld van 1 V/m in het water aan te brengen;
- Menselijke geleidbaarheid = 0,21 S/m;
- Zoet watergeleidingsvermogen = 0,1 S/m;

Figuur 22 illustreert het uniforme veld in termen van veldlijnen en potentiaallijnen.



Figuur 21 Ondergedompeld menselijk model in een uniform elektrisch veld: (a) Mens tussen twee platen met een uniform elektrisch veld; (b) ingezoomd beeld van het menselijk model.



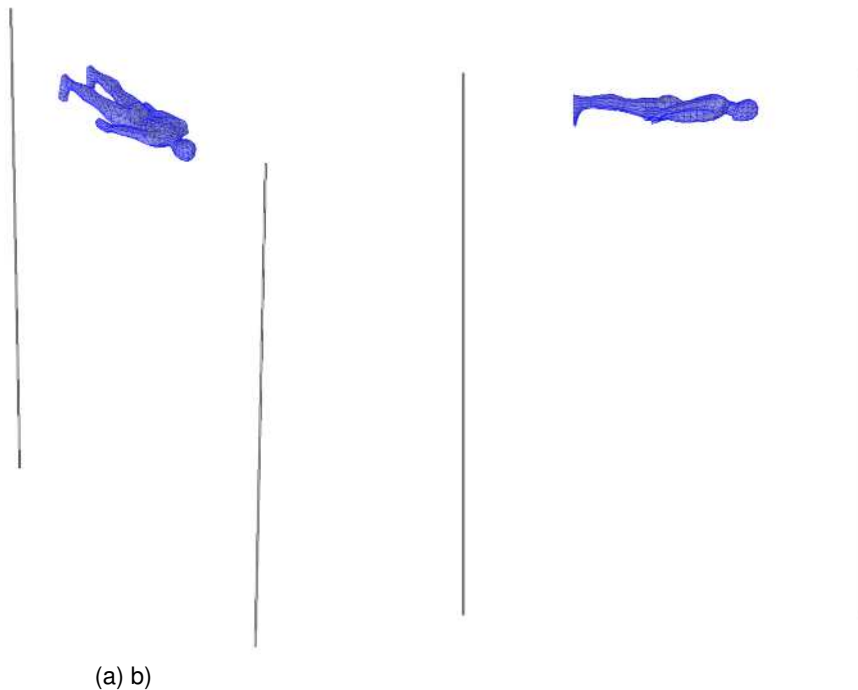
Figuur 22 Boveenaanzicht van een ondergedompeld menselijk model in een uniform elektrisch veld.

E-5.3 Menselijk model ondergedompeld in een niet-uniform elektrisch veld

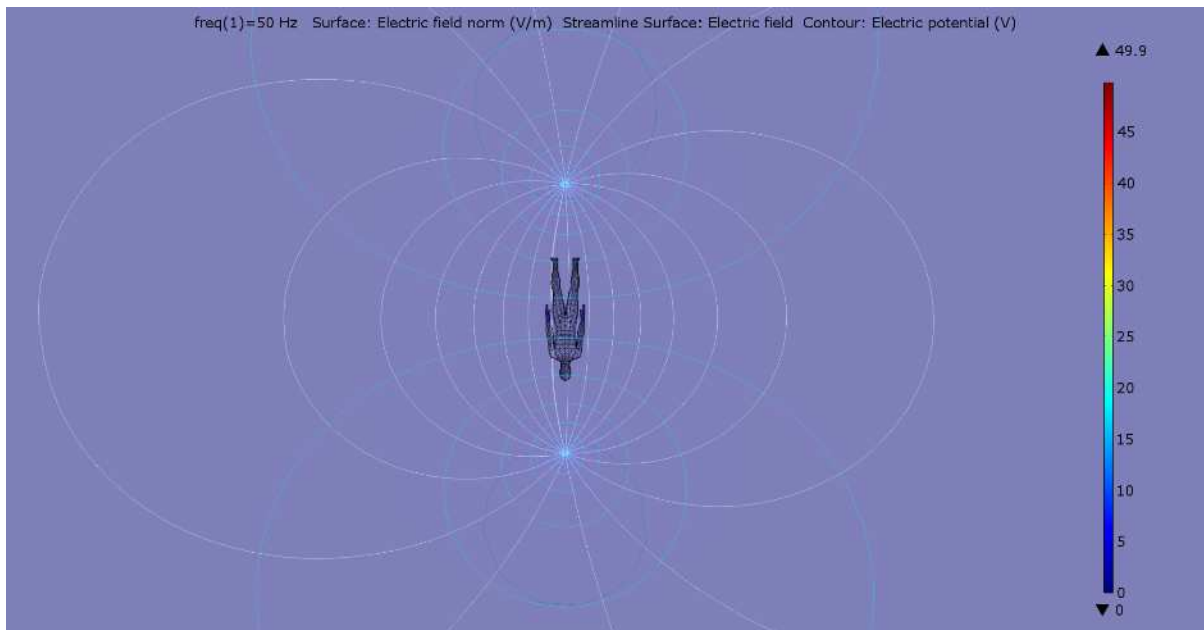
Voor de beoordeling met betrekking tot het niet-uniform elektrisch veld geldt het volgende:

- De bovenkant van de rug van de zwemmer lag 200 mm onder het wateroppervlak;
- Het niet-uniforme elektrisch veld werd gecreëerd door 2 x 5 m lange staven met straal = 0,01 m; de staven bevonden zich 1 m aan weerszijden van het menselijke model, zoals getoond in Figuur 23;
- Menselijke geleidbaarheid = 0,21 S/m;
- Zoet watergeleidingsvermogen = 0,1 S/m;

Figuur 24 illustreert het niet-uniforme veld in termen van veldlijnen en potentiaalijnen.



Figuur 23 Ondergedompeld menselijk model in een niet-uniform elektrisch veld: (a) Perspectief; (b) Zijaanzicht.



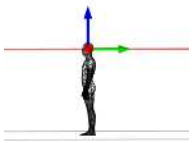
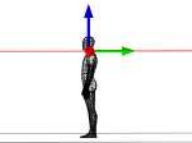
Figuur 24 Bovenaanzicht van een ondergedompeld menselijk model in een niet-uniform elektrisch veld.

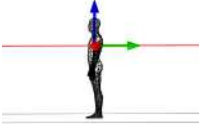
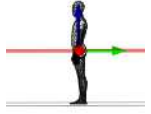
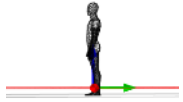
Uit Figuur 24 blijkt dat het gebied dat door het menselijke model wordt bestreken, in wezen een uniform elektrisch veld over het hele gebied vertoont. Dit suggereert dat de mens zich zeer dicht bij de bron van het elektrisch veld moet bevinden om in een niet-uniform elektrisch veld aanwezig te zijn. Daarom is bij de veiligheidsbeoordeling alleen gekeken naar het uniforme elektrisch veld.

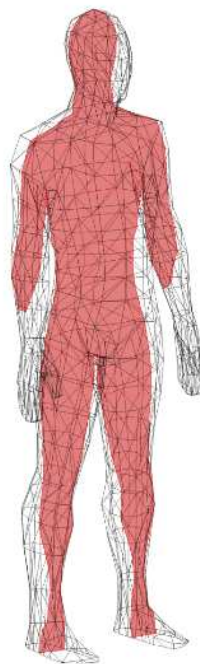
E-5.4 De overwogen snijvlakken

In Tabel 8 staan de horizontale niveaus van de insnijding door het lichaam die bij de veiligheidsbeoordeling in acht zijn genomen. Figuur 25 toont het bij de veiligheidsbeoordeling in aanmerking genomen verticale snijniveau.

Tabel 8 Overwogen snijvlakken voor de menselijke modellen.

Nr.	Niveau	Afbeelding
1	Oog	
2	Hals	

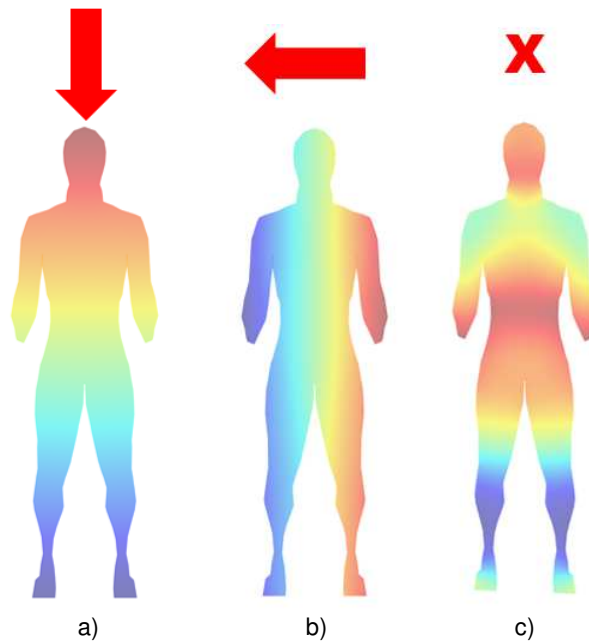
3	Torso	
4	Bekken	
5	Enkel	



Figuur 25 Overwogen verticaal snijvlak.

E-5.5 Overwegingen voor de oriëntatie van het elektrisch veld

Figuur 26 toont de drie elektrisch veldoriëntaties die in acht werden genomen: Verticaal (hoofd tegen voeten), horizontaal (schouder tegen schouder) en horizontaal (voorkant tegen rug). Het slechtste geval was de verticale oriëntatie en werd in de veiligheidsanalyse in acht genomen. Zie aanhangsel C voor meer details.



Figuur 26 Oriëntatie van elektrisch veld beschouwd: a) Verticaal (hoofd tegen voeten); b) Horizontaal (schouder tegen schouder); c) Horizontaal (voorkant tegen achterkant).

E-5.6 Lichaamsgrootte

Uit het werk van Carghill /8/ blijkt dat de doorsnede van de romp bij een “body mass index” (BMI) van 22,3 wordt geschat op 0,05 m² /8/. Het wordt opgemerkt dat de BMI = gewicht (kg) / lengte² (m²) /8/. Een persoon van 1,72 m met een BMI van 22,3 heeft een gewicht van 70 kg.

De dwarsdoorsnede van het volwassen model bedroeg 0,059 m² en die van het kind 0,028 m².

Er was redelijke overeenstemming tussen de doorsnede van het volwassen menselijke model en de persoon waarover Carghill (2017) /8/ rapporteerde.

Een typische 6-jarige jongen heeft een BMI van 16,8 (85th percentiel) en een 7-jarige jongen heeft een BMI van 15,5 (50th percentiel). Zie aanhangsel E voor meer details.

Het feit dat de stroomdichtheid en het elektrisch veld in het lichaam iets lager waren voor het kindmodel, vergeleken met het volwassen model, wijst erop dat de dreiging groter is voor een groter persoon ondergedompeld in water dan voor een kleiner persoon (als er een dreiging bestaat). Dit laatste is het tegenovergestelde van het geval van contactstroom, waarbij een groter persoon een grotere stroom kan verdragen.

E-5.7 Bevindingen - Modelkalibratie aan 10 kV elektrisch veld in lucht

Tabel 9 geeft een samenvatting van de bevindingen van de kalibratie van de modellen aan het elektrisch veld van 10 kV/m in lucht. Deze wordt vervolgens ook vergeleken met de experimentele bevindingen uit /14/. Meer details staan in aanhangsel A.

Tabel 9 Samenvatting van de resultaten van de kalibratie van de modellen aan het elektrisch veld van 10 kV/m.

Nr.	Deel van het lichaam	Geïnduceerde stroomdichtheid berekend voor het kindmodel (nA/cm ²)	Geïnduceerde stroomdichtheid berekend voor de volwassene (nA/cm ²)	Geïnduceerde stroomdichtheid experiment van /14/ (nA/cm ²)
1	Hoofd	133	120	
2	Hals	572	373	466
3	Torso	214	155	
4	Bekken	315	218	225
5	Enkel	2280	1634	1866

Uit bovenstaande Tabel blijkt het volgende:

- De in het model voor volwassenen berekende waarden van de stroomdichtheid komen goed overeen met de experimentele waarden uit de gepubliceerde literatuur /14/;
- De bevindingen wijzen erop dat het gebruik van de gemiddelde lichaamsgeleidbaarheid van 0,21 S/m wordt ondersteund en deze geleidbaarheid is gebruikt bij de studie en de veiligheidsbeoordeling.

Op basis van het bovenstaande kan het model als gekalibreerd worden beschouwd en kan het worden gebruikt bij de studie en de analyse van de waterveiligheid.

E-5.8 Bevindingen - Modelkalibratie naar 1 mA contactstroom

Tabel 10 bevat een samenvatting van de bevindingen van de kalibratie van de modellen aan de contactstroom van 1 mA en een samenvatting van de berekende stroomdichtheid op basis van de modellen voor mensen en kinderen en het elektrisch veld in het lichaam. Zie aanhangsel B voor meer details.

Tabel 10: Samenvatting van de berekende stroomdichtheid en het elektrisch veld in het lichaam op basis van de menselijke en kindmodellen bij een contactstroom van 1 mA.

VOLWASSEN

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (µV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	5,03	2,4	Maxima;
2	Hals	336	140	Maxima = 1,27 µA/cm ² ; 610 µV/cm
3	Torso (positie van het hart)	1 722	860	Maxima = 37,2 µA/cm ² ; 17 700 µV/cm
4	Bekken	2 012	930	Maxima = 38,9 µA/cm ² ; 18 500 µV/cm
5	Enkel	10 348	4 800	Maxima = 14,1 µA/cm ² ; 6 700 µV/cm
	Gemiddeld	2 885	1 347	
	Gemiddelde exclusief enkel	1 019	483	

KINDER

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (µV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	4,9	2,32	Maxima;
2	Hals	610	300	Maxima = 2,68 µA/cm ² ; 1 270 µV/cm
3	Torso (positie van het hart)	3 291	1 840	Maxima = 85,1 µA/cm ² ; 40 500 µV/cm
4	Bekken	3 816	1 820	Maxima = 75,4 µA/cm ² ; 35 900 µV/cm
5	Enkel	20 373	9 850	Maxima = 27,8 µA/cm ² ; 13 200 µV/cm
	Gemiddeld	5 619	2 763	
	Gemiddelde exclusief enkel	1 931	991	

Uit Tabel 10 blijkt het volgende:

- Bij een contactstroom van 1 mA van hand tot voet is de stroomdichtheid bij het kind groter dan bij de volwassene (dit is het tegenovergestelde van de bevinding bij de persoon die in water is ondergedompeld).

- De drempelwaarde voor ademstilstand (volgens Tabel 6 in Appendix D (Carghill, 2017) /8/) is 64 000 nA/cm². De stroomdichtheden die in Tabel 10 hierboven zijn genoteerd, liggen ruim binnen deze laatste drempelwaarde.

E-5.9 Bevindingen - Modelkalibratie tot 1 V/m elektrisch veld in zoet water

Tabel 11 bevat een samenvatting van de bevindingen van de kalibratie van de modellen bij een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water en een samenvatting van de stroomdichtheid in het lichaam. Zie aanhangsel C voor meer details.

Tabel 11: Samenvatting van de berekende stroomdichtheid op basis van de menselijke en kindmodellen en het elektrisch veld in het lichaam.

VOLWASSEN

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (µV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	1,77 x 10 ⁴		Maximum = 17,7 µA/cm ²
2	Hals	2,14 x 10 ⁴		Maximum = 24,4 µA/cm ²
3	Torso (positie van het hart)	1,71 x 10 ⁴		Maximum = 17,1 µA/cm ²
4	Bekken	1,89 x 10 ⁴		Maximum = 19,8 µA/cm ²
5	Enkel	2,09 x 10 ⁴		Maximum = 22,3 µA/cm ²
	Gemiddeld	1,92 x 10⁴		
	Gemiddelde exclusief enkel	1,88 x 10⁴		

KINDER

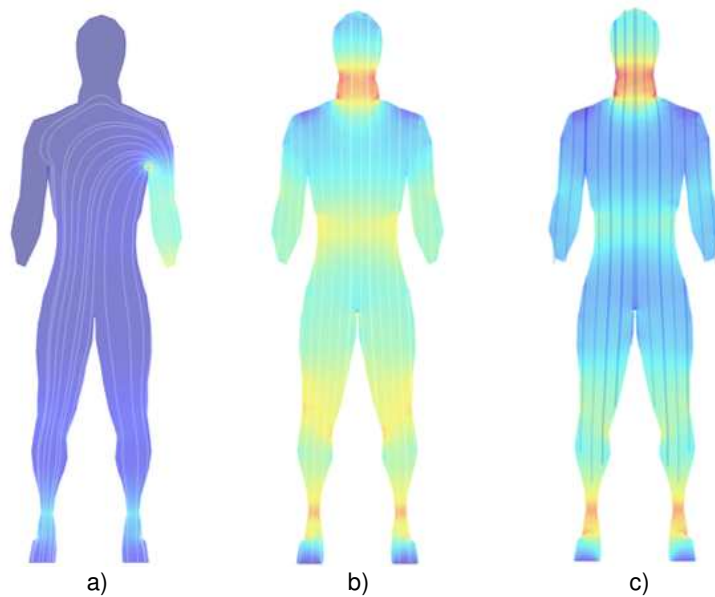
Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (µV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	1,73 x 10 ⁴		Maximum = 17,3 µA/cm ²
2	Hals	2,13 x 10 ⁴		Maximum = 24,4 µA/cm ²
3	Torso (positie van het hart)	1,70 x 10 ⁴		Maximum = 17,6 µA/cm ²
4	Bekken	1,81 x 10 ⁴		Maximum = 19,7 µA/cm ²
5	Enkel	2,08 x 10 ⁴		Maximum = 22,0 µA/cm ²
	Gemiddeld	1,89 x 10⁴		
	Gemiddelde exclusief enkel	1,84 x 10⁴		

Uit bovenstaande Tabel 11 blijkt het volgende:

- In vergelijking met de aanrakingsstroom is de stroomverdeling door het lichaam uniform / verdeeld wanneer het lichaam in water is ondergedompeld.
- In vergelijking met het geval van de volwassene is de stroomdichtheid bij het kind iets lager dan die voor de volwassene. Daarom zal bij de veiligheidsbeoordeling het model voor volwassenen centraal staan.

E-5.10 Samenvatting en besluit - Modeltoepassing

Figuur 27 vergelijkt de modellen voor: (a) Contactstroom in lucht; (b) Uniform elektrisch veld in water en (c) Niet-uniform elektrisch veld in water. Uit Figuur 27 blijkt het effect van de verschillende scenario's op de stroomdichtheid (witte/blauwe stroomlijnen) in het lichaam.



Figuur 27 Model behorende bij: (a) contactstroom in lucht; b) uniform elektrisch veld in water en c) niet-uniform elektrisch veld in water.

Vanwege de complexere stroomverdeling in het lichaam in het geval van de contactstroom (Figuur 27(a)) is het geval van de contactstroom buiten het veiligheids criterium gehouden (zoals gepresenteerd in Appendix D).

Aanhangsel A bij appendix E: MODELKALIBRATIE - 10 kV/m ELEKTRISCH VELD

E-A.1 Parameters van het model voor volwassenen

Hoogte: 1,72 m

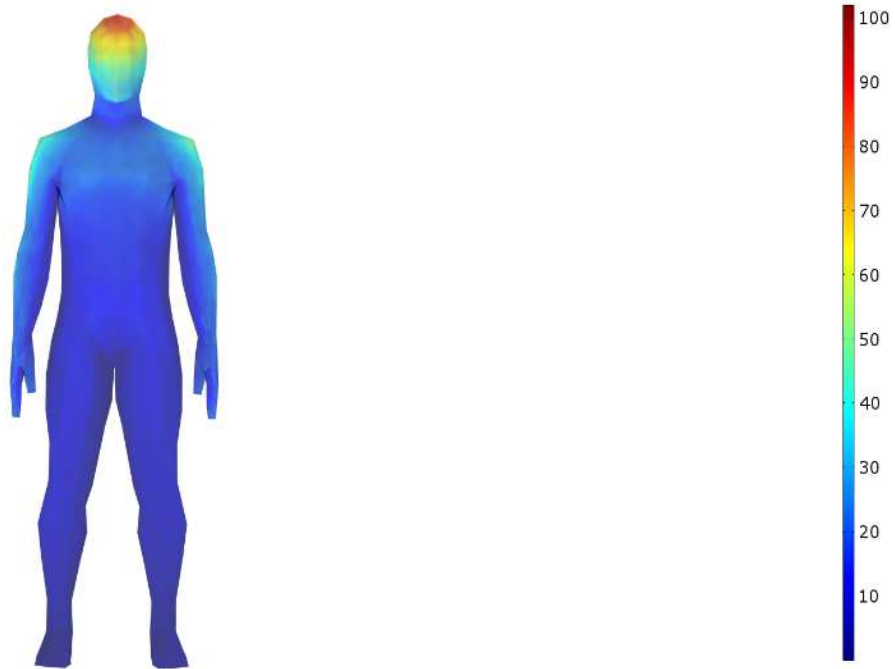
Gemiddelde Geleidingsvermogen: 0,21 S/m (gebaseerd op het gemiddelde geleidingsvermogen dat in de studie van Poljak, *et al*, 2005 /14/ is gebruikt, zoals hieronder weergegeven).

Body portion	Region	Conductivity σ [S/m]
Head	I, II	0.12
Neck	III	0.6
Shoulders	IV	0.04
Thorax	V	0.11
Pelvis and crotch	VI	0.11
Knee	VII	0.52
Ankle	VIII	0.04
Foot	IX	0.11

E-A.2 Kalibratie van het model voor volwassenen - gearde mens in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m

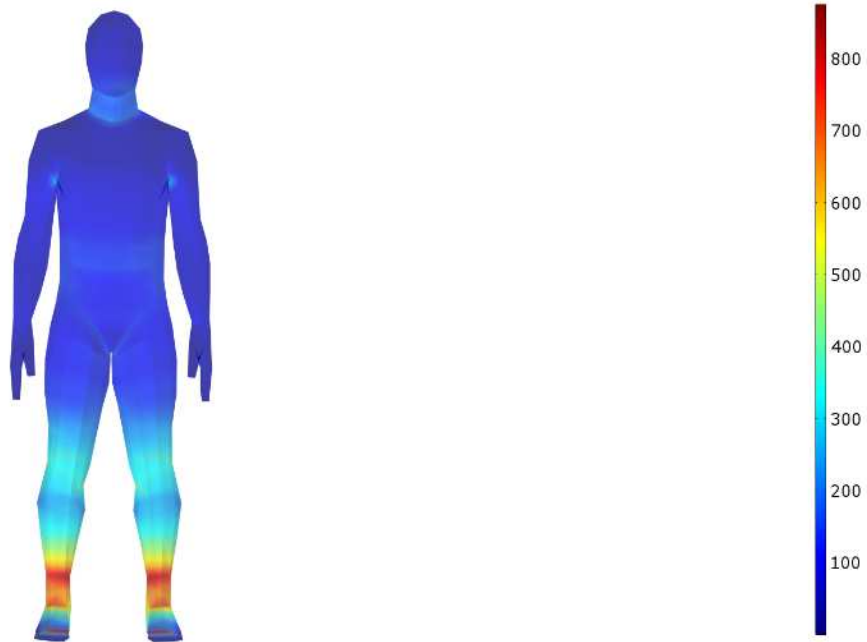
Figuren E-A-1 en A-2 tonen respectievelijk het elektrisch veld en de oppervlaktestroomdichtheid van een gearde mens in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.

freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (kV/m)



Figuur E-A-1 Elektrisch oppervlakteveld van een gearde mens in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.

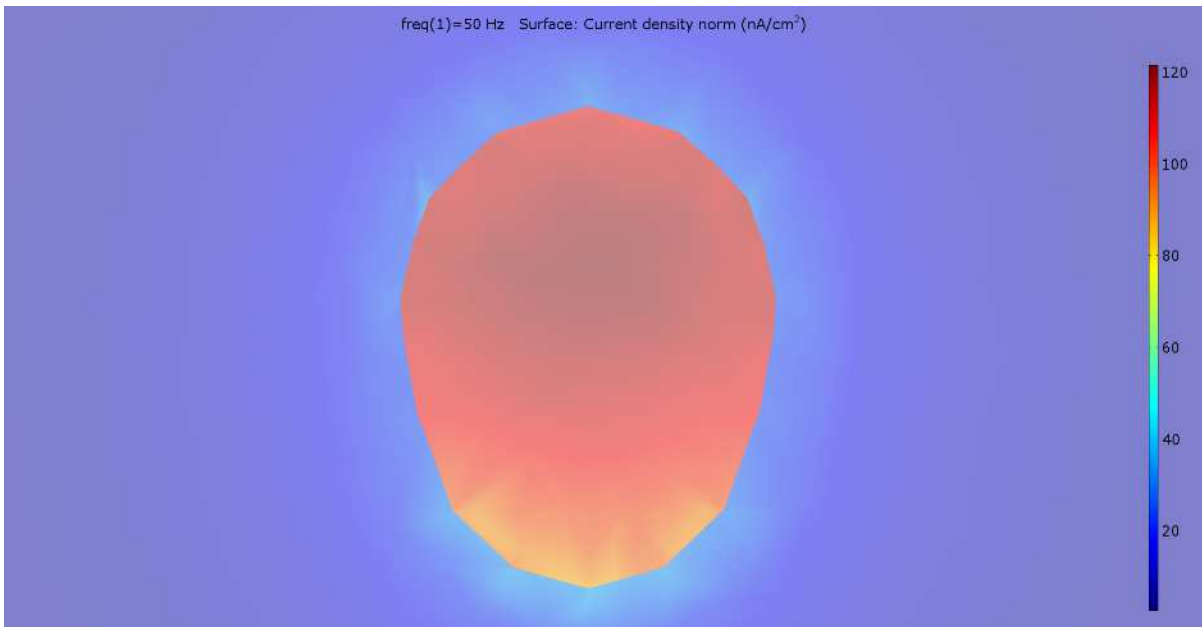
freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



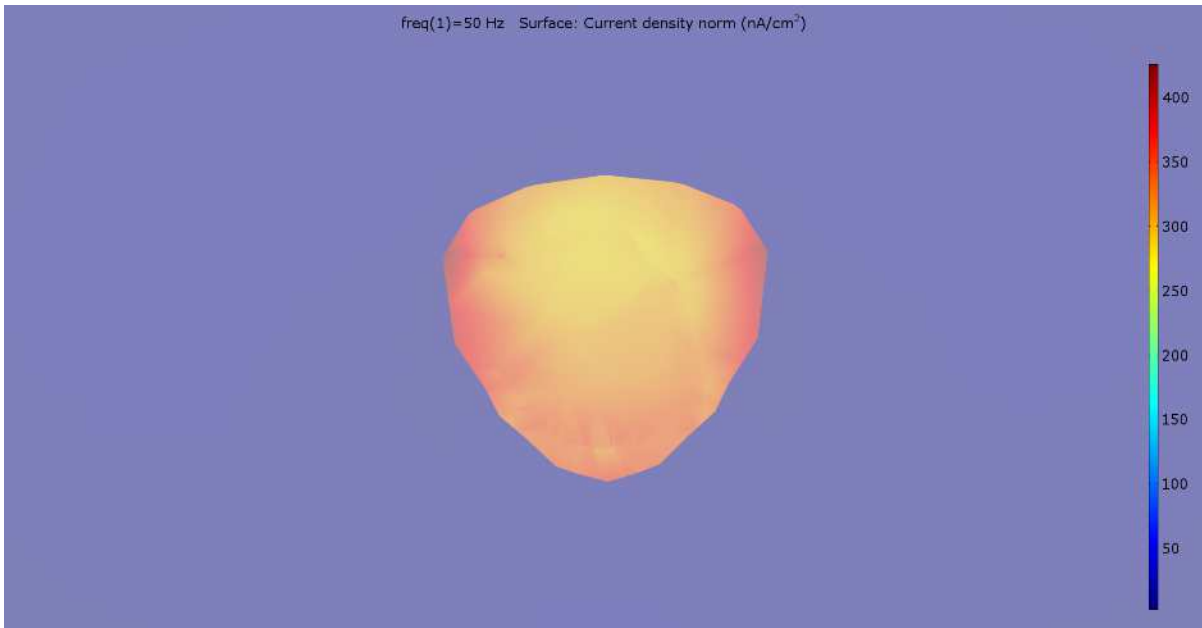
Figuur E-A-2 Oppervlakte stroomdichtheid van een gearde mens in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.

E-A.3 Stroomdichtheid - gearde volwassene in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m

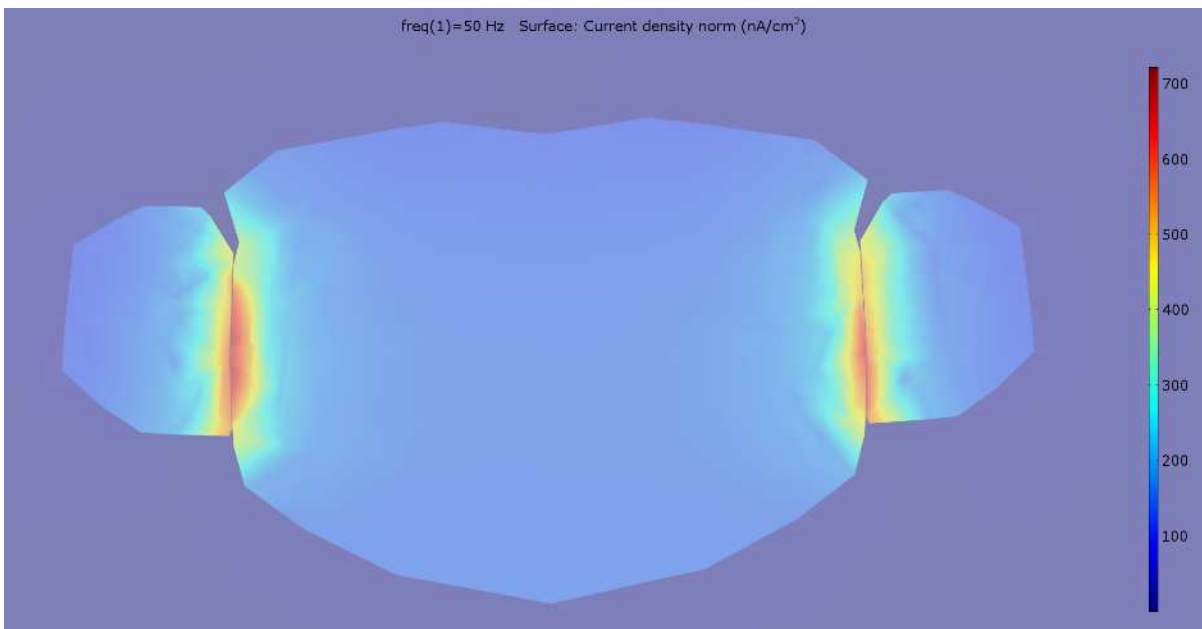
Figuren E-A-3 tot en met A-7 tonen de stroomdichtheid in verschillende delen van het lichaam van een gearde mens (volwassene) in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.



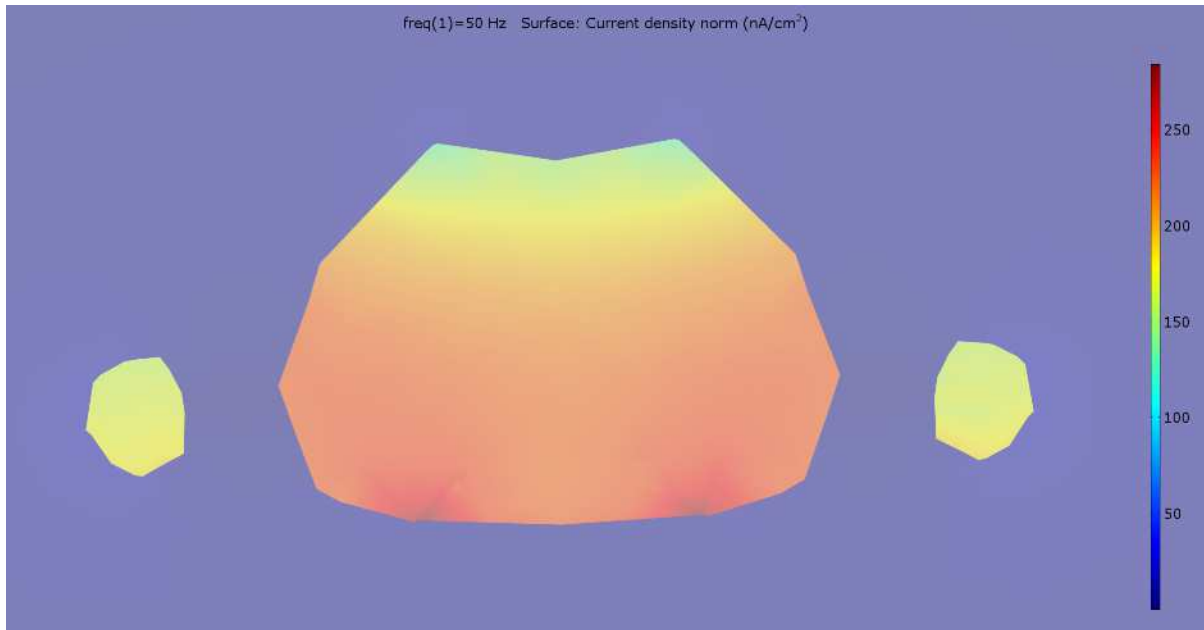
Figuur E-A-3 Ooghoogte: Max = 120 nA/cm²



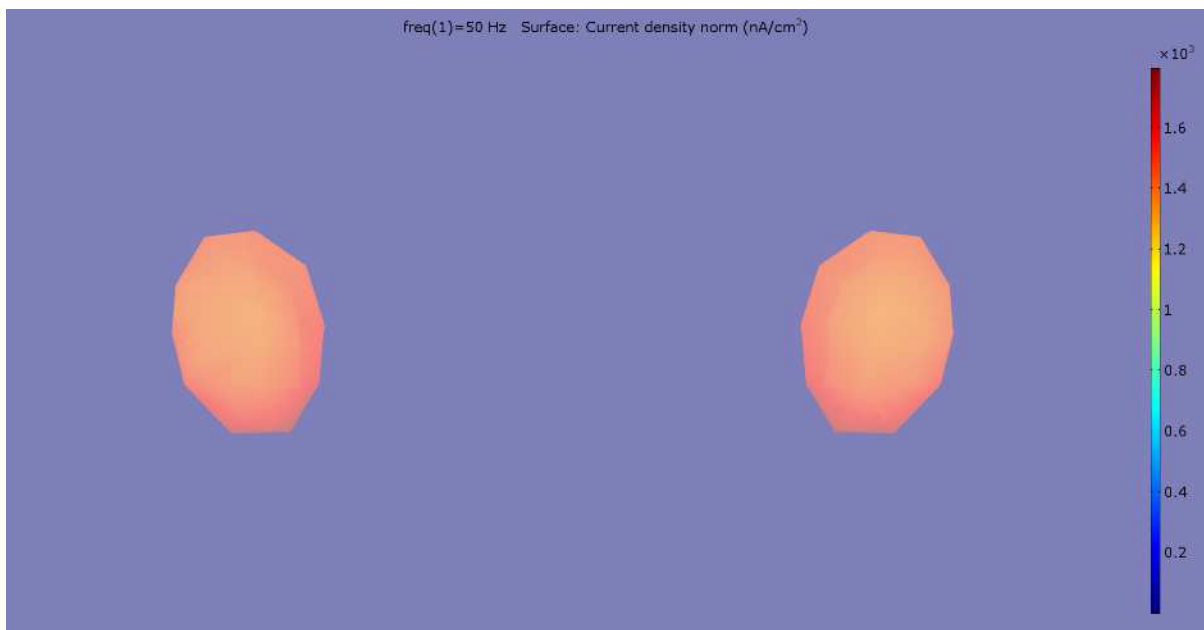
Figuur E-A-4 Halsniveau: Max = 373 nA/cm² (Gebaseerd op gemiddelde van Poljak, Peratta, Brebbia, 2005: 466 nA/cm²)



Figuur E-A-5 Rompniveau: Blauw Max = 155 nA/cm² Rood Max = 634 nA/cm²



Figuur E-A-6 Bekkenniveau: Oranje Max = 218 nA/cm² Armen Geel Max = 170 nA/cm² Rood Max = 266 nA/cm² gebaseerd op gemiddelde van Poljak, Peratta, Brebbia, 2005: 225 nA/cm²)



Figuur E-A-7 Enkelniveau: (Max = 1634 nA/cm² (gebaseerd op gemiddelde van Poljak, Peratta, Brebbia, 2005: 1866 nA/cm²)

E-A.4 Slotopmerkingen - Stroomdichtheid - geaarde volwassene in een uniform E-Veld van 10 kV/m

- Gebruik een model op basis van degelijke overeenstemming van de stroomdichtheidswaarden in verband met de gepubliceerde literatuur (Poljak, Peratta, Brebbia, 2005) /14/ - Zie Tabel E-A-1;

- Gebruik het model voor volwassenen op basis van overeenstemming over de gemiddelde lichaamsgeleiding

E-A.5 Parameters van het kindmodel

Hoogte: 1,22 m (gemakkelijk te schalen en typisch voor een kind van 6 jaar) - zie Appendix I voor details.

Schaalfactor: 0,7093

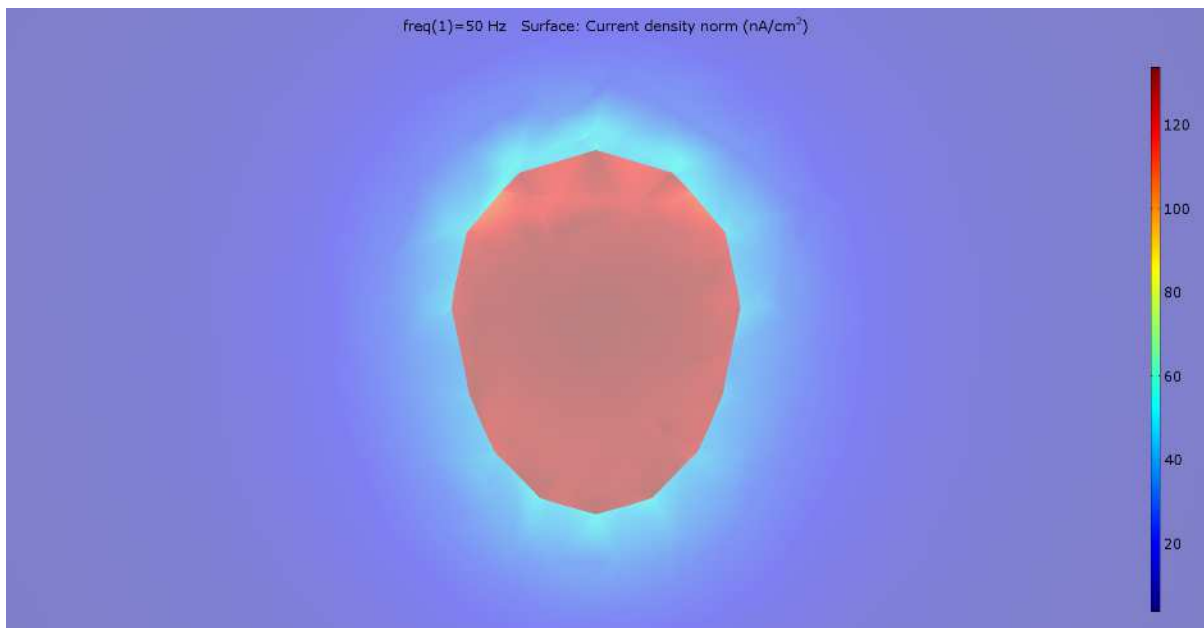
Gemiddelde Geleidingsvermogen: 0,21 S/m (gebaseerd op gemiddelde van Poljak, Peratta, Brebbia, 2005) /14/.

Snijvlakken voor een kind van 6 jaar

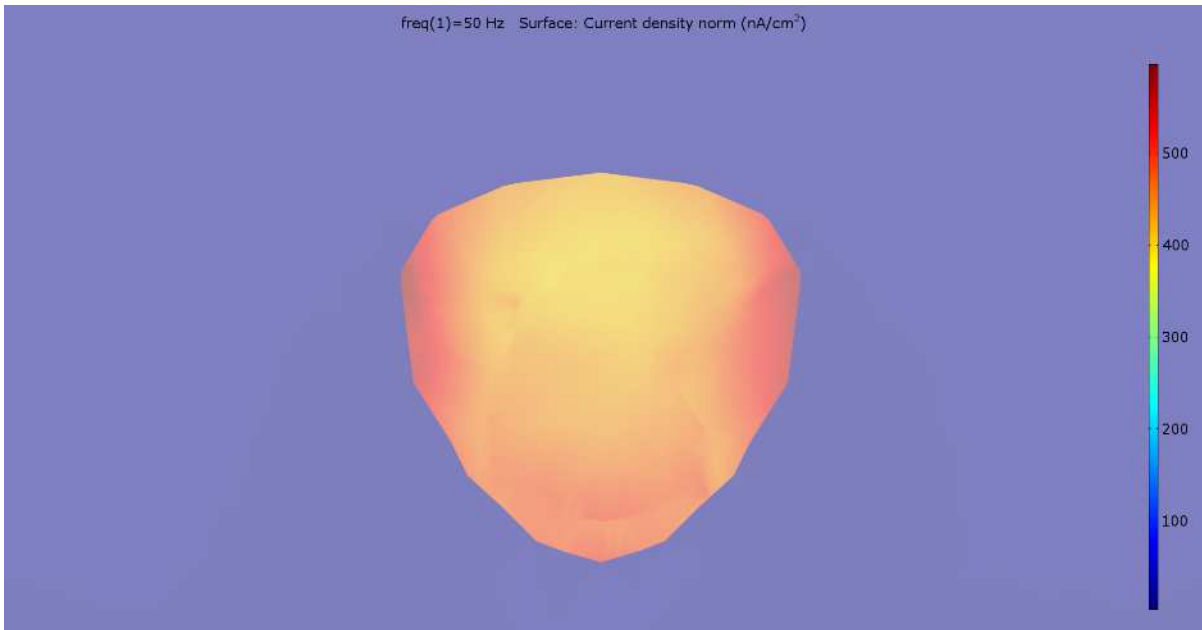
- **Ooghoogte:** 1,15 m
- **Hals:** 1.025 m
- **Romp:** 0,885 m
- **Bekken:** 0,631 m
- **Enkel:** 0,113 m

E-A.6 Stroomdichtheid - geaard kind in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m

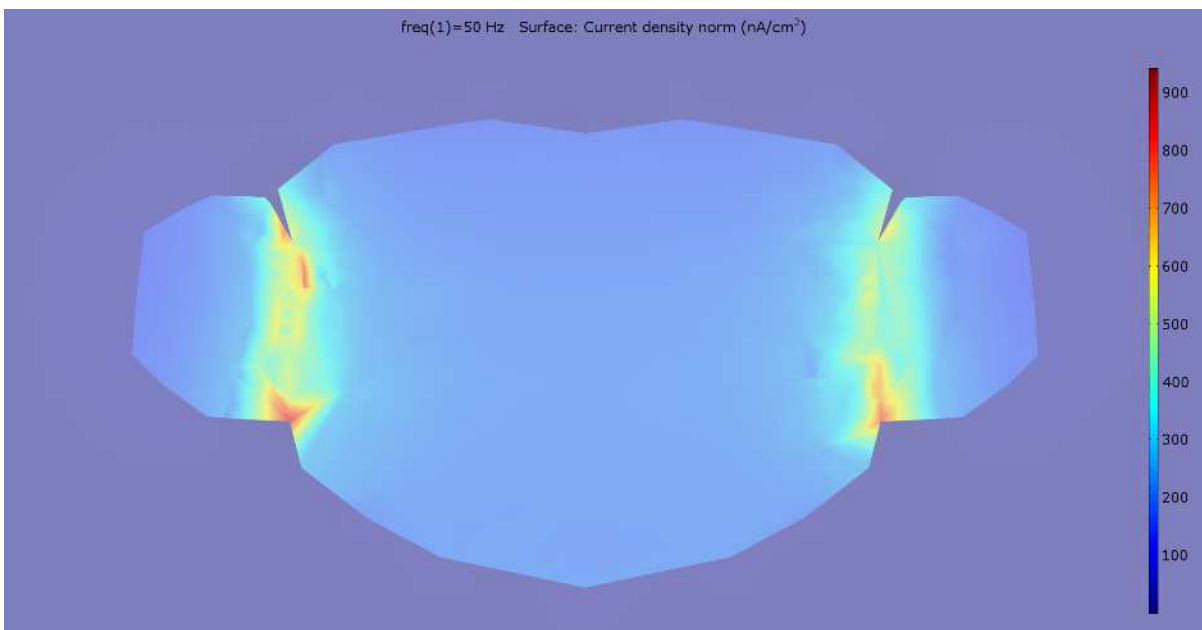
Figuren E-A-8 tot A-12 tonen de stroomdichtheden in verschillende delen van het lichaam van een geaard mens (kind) in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.



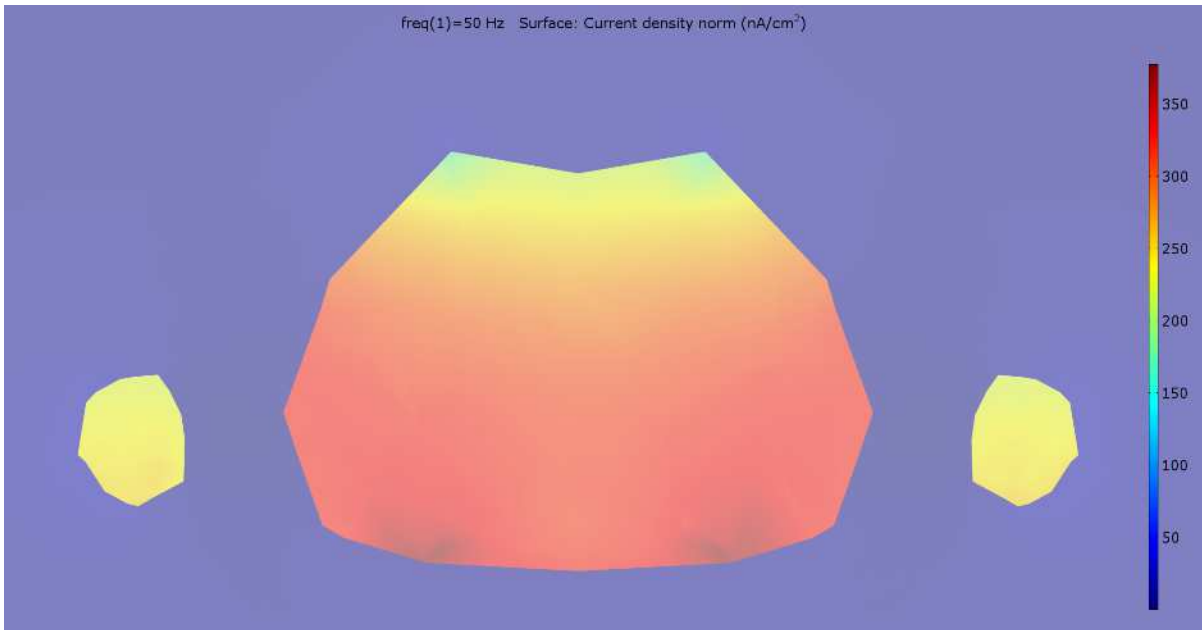
Figuur E-A-8 Ooghoogte: Max = 133 nA/cm²



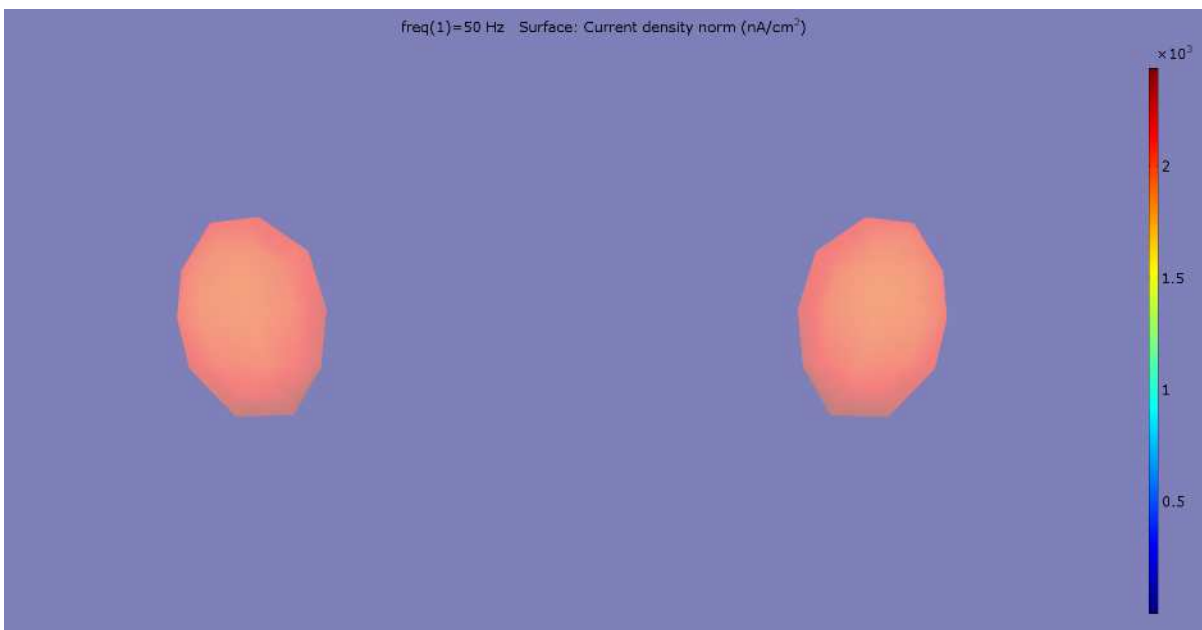
Figuur E-A-9 Halsniveau: Max = 572 nA/cm²



Figuur E-A-10 Rompniveau: Blauw Max = 214 nA/cm² Rood Max = 773 nA/cm²



Figuur E-A-11 Bekkenniveau: Oranje Max = 315 nA/cm² Gele armen Max = 243 nA/cm² Rood Max = 372 nA/cm²



Figuur E-A-12 Enkelniveau: Max = 2280 nA/cm²

E-A.7 Samenvatting - Stroomdichtheid - gearde mens in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m

Tabel E-A-1 geeft een samenvatting van de bevindingen van de modelkalibratie aan het elektrisch veld van 10 kV/m en in vergelijking met de experimentele bevindingen uit /14/.

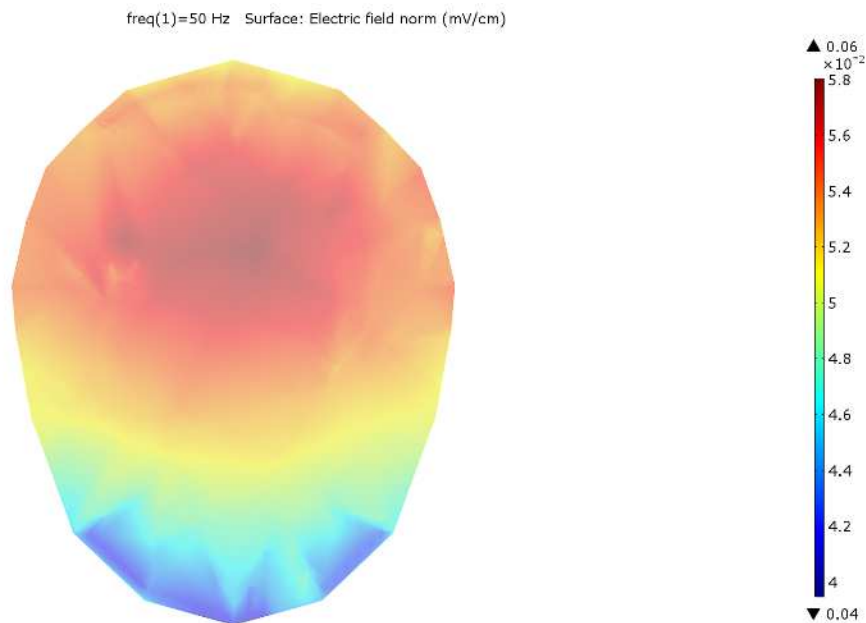
Tabel E-A-1: Samenvatting van de bevindingen van de kalibratie van de modellen aan het elektrisch veld van 10 kV/m.

Nr.	Deel van het lichaam	Geïnduceerde stroomdichtheid berekend voor het kind-model (nA/cm ²)	Geïnduceerde stroomdichtheid berekend voor de volwassene (nA/cm ²)	Geïnduceerde stroomdichtheid Experiment van /14/ (nA/cm ²)
1	Hoofd	133	120	
2	Hals	572	373	466
3	Torso	214	155	
4	Bekken	315	218	225
5	Enkel	2280	1634	1866

Tabel E-A-1 laat zien dat de stroomdichtheid in het model voor volwassenen en het experiment in /14/ redelijk overeenkomen. Het verschil kan te wijten zijn aan de specifieke weefselgeleidingsvermogens die in /14/ zijn gebruikt.

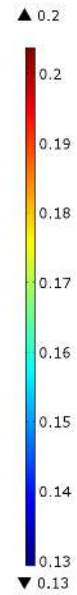
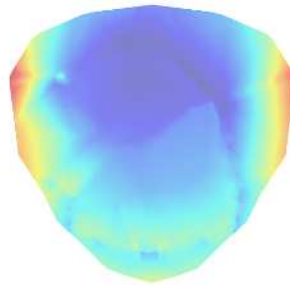
E-A.8 Elektrisch veld in het lichaam van een gearde volwassene in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m

Figuren E-A-13 tot A-17 tonen het elektrische veld in verschillende gebieden binnen het lichaam van een gearde mens (volwassene) in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.



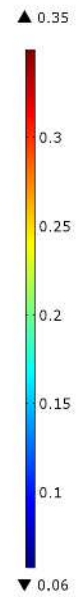
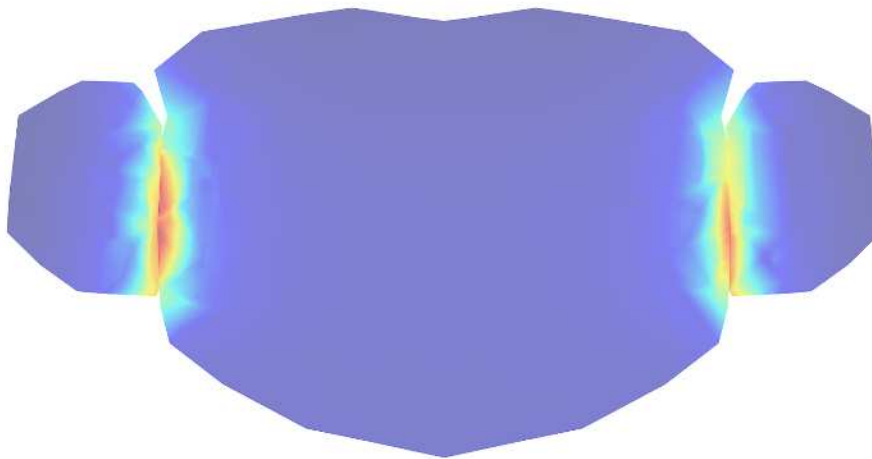
Figuur E-A-13 Ooghoogte: Max = 0,06 mV/cm

freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)

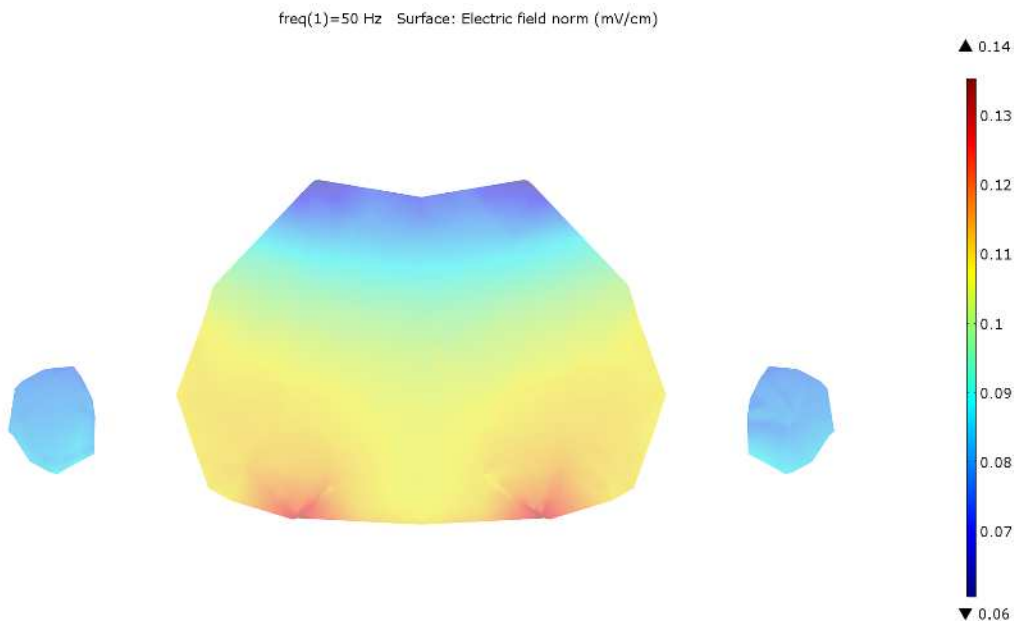


Figuur E-A-14 Halsniveau: Max = 0,2 mV/cm

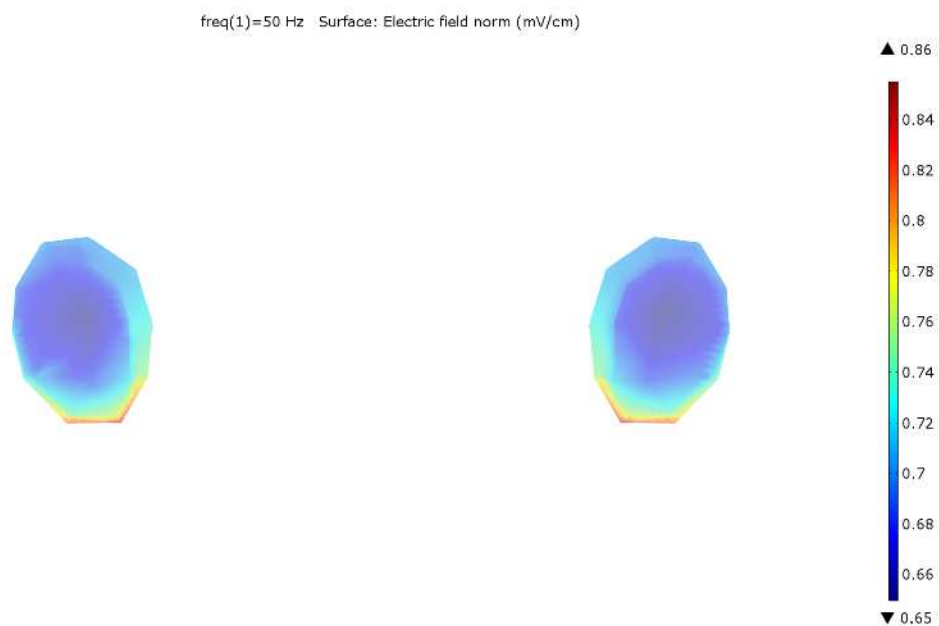
freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)



Figuur E-A-15 Rompniveau: Max = 0,35 mV/cm



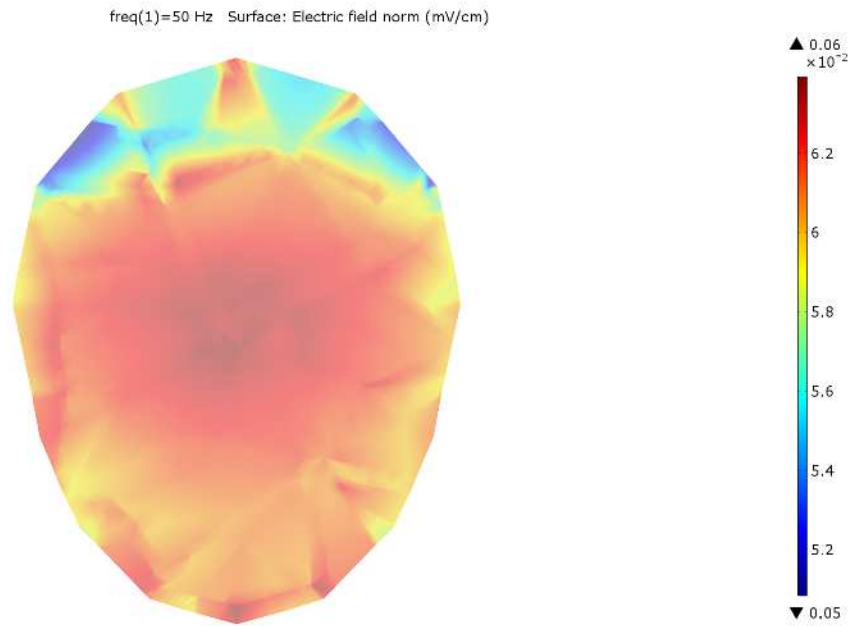
Figuur E-A-16 Bekkenniveau: Max = 0,14 mV/cm



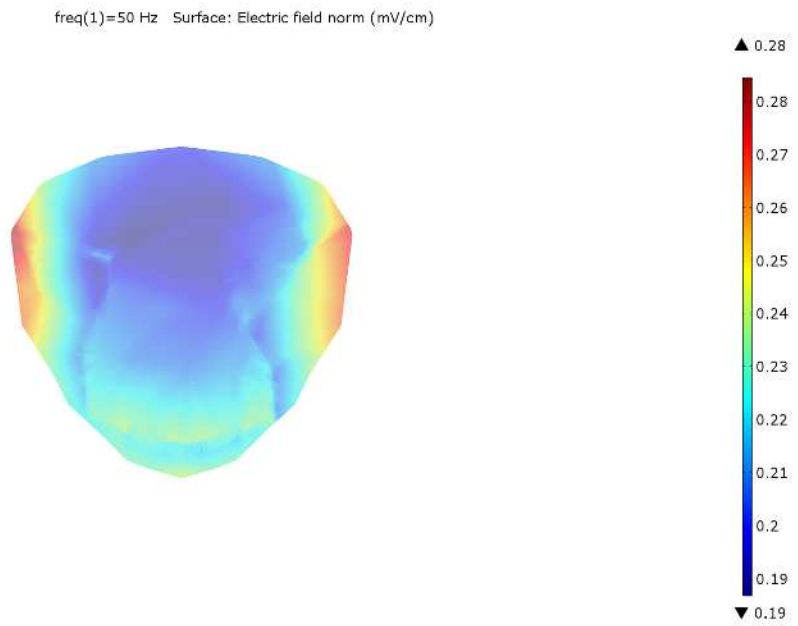
Figuur E-A-17 Enkel niveau: Max = 0,86 mV/cm Blauw Max = 0,66 mV/cm

E-A.9 Elektrisch veld in het lichaam van een geard kind in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m

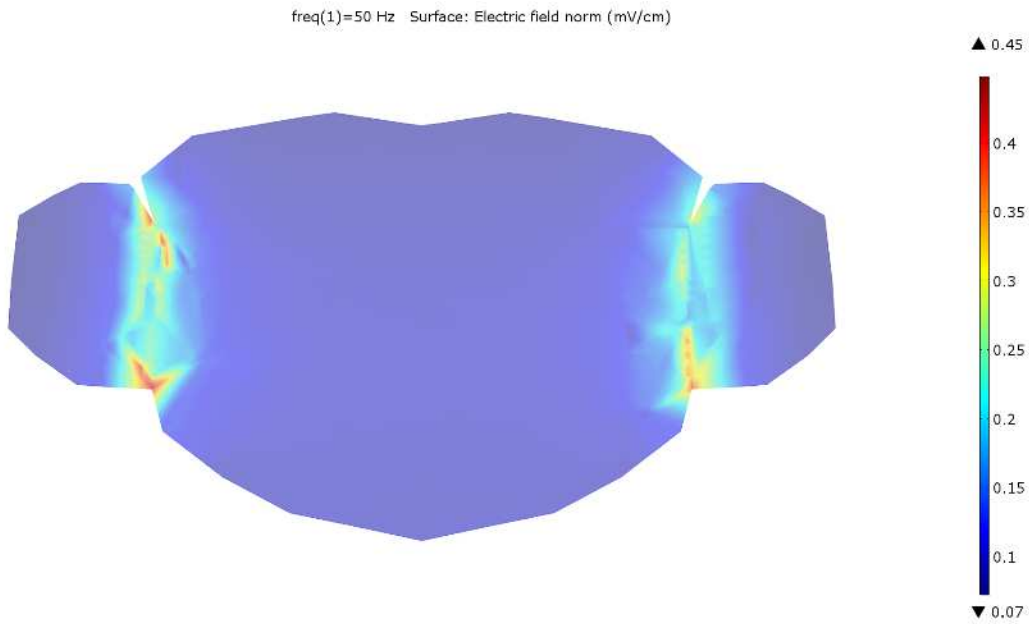
Figuren E-A-18 t/m A-22 tonen het elektrisch veld in verschillende gebieden binnen het lichaam van een geard mens (kind) in een uniform elektrisch veld van 10 kV/m.



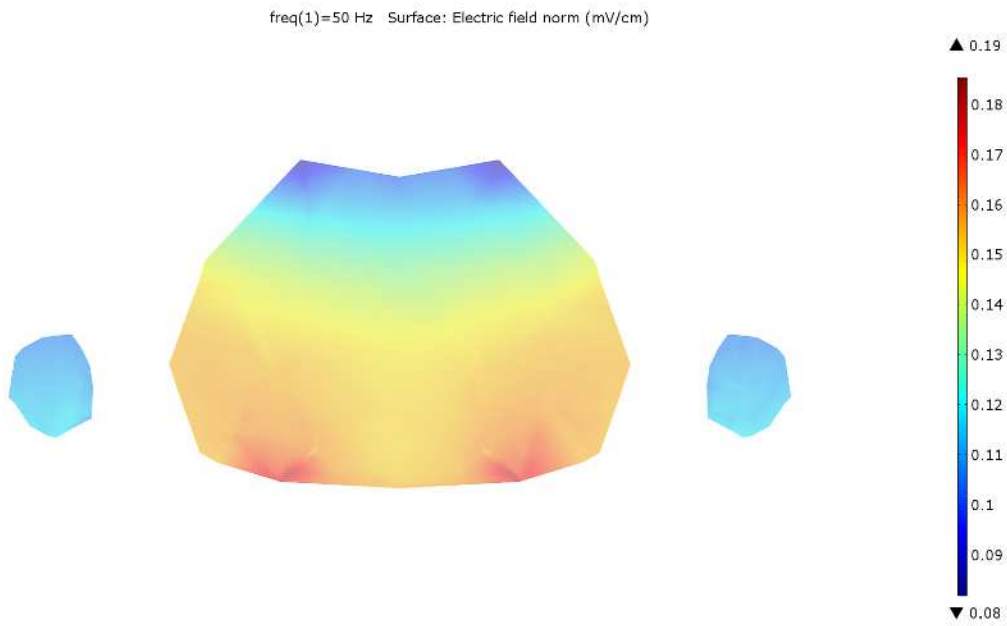
Figuur E-A-18 Ooghoogte: Max = 0,06 mV/cm



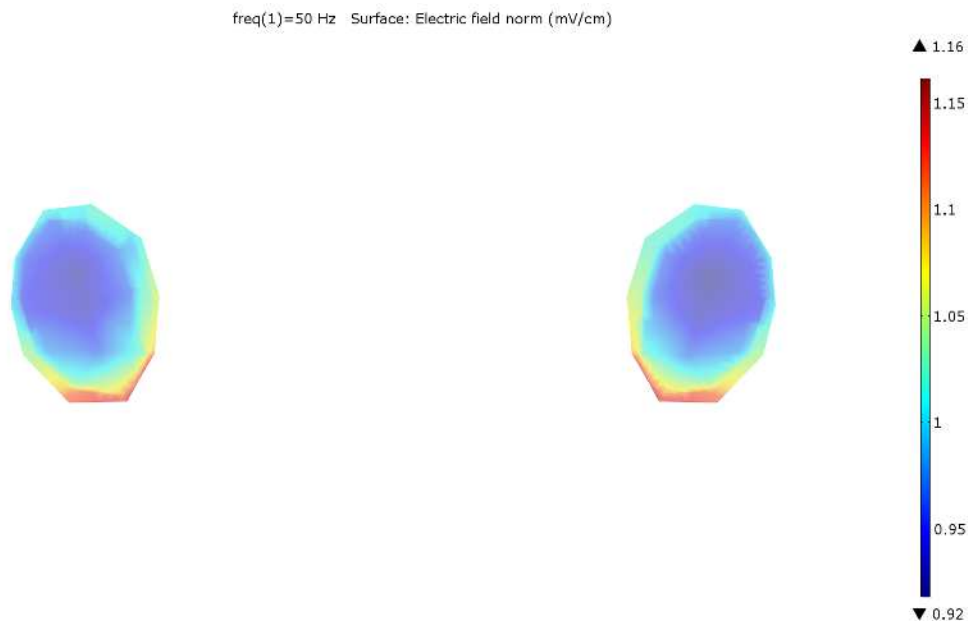
Figuur E-A-19 Halsniveau: Max = 0,28 mV/cm



Figuur E-A-20 Rompniveau: Max = 0,45 mV/cm



Figuur E-A-21 Bekkenniveau: Max = 0,19 mV/cm



Figuur E-A-22 Enkel niveau: Max = 1,16 mV/cm Blauw Max = 0,94 mV/cm

Conclusie:

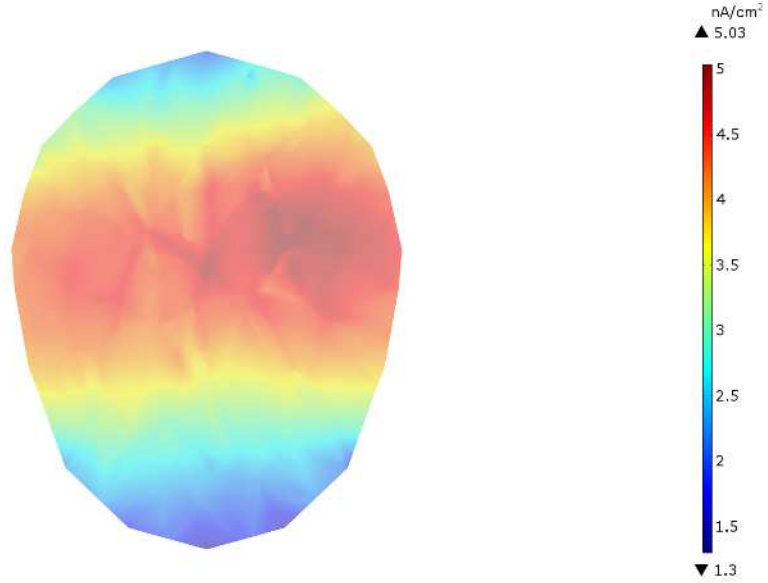
- Alle niveaus onder ICNIRP 4 mV/cm: Kan dus maximale stroomdichtheid gebruiken als leidraad voor veiligheidscriteria.

Aanhangsel B bij appendix E: MODELKALIBRERING - 1 mA CONTACTCURRENT

E-B.1 Stroomdichtheid - volwassen contactstroom 1 mA

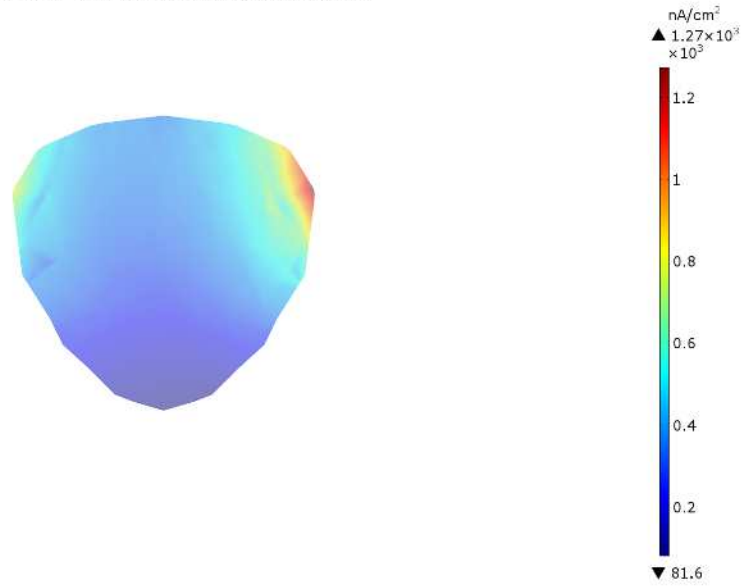
Figuren E-B-1 tot en met B-5 tonen de stroomdichtheid in verschillende delen van het lichaam van een mens (volwassene) in contact (linkerhand) met een contactstroom van 1 mA.

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)

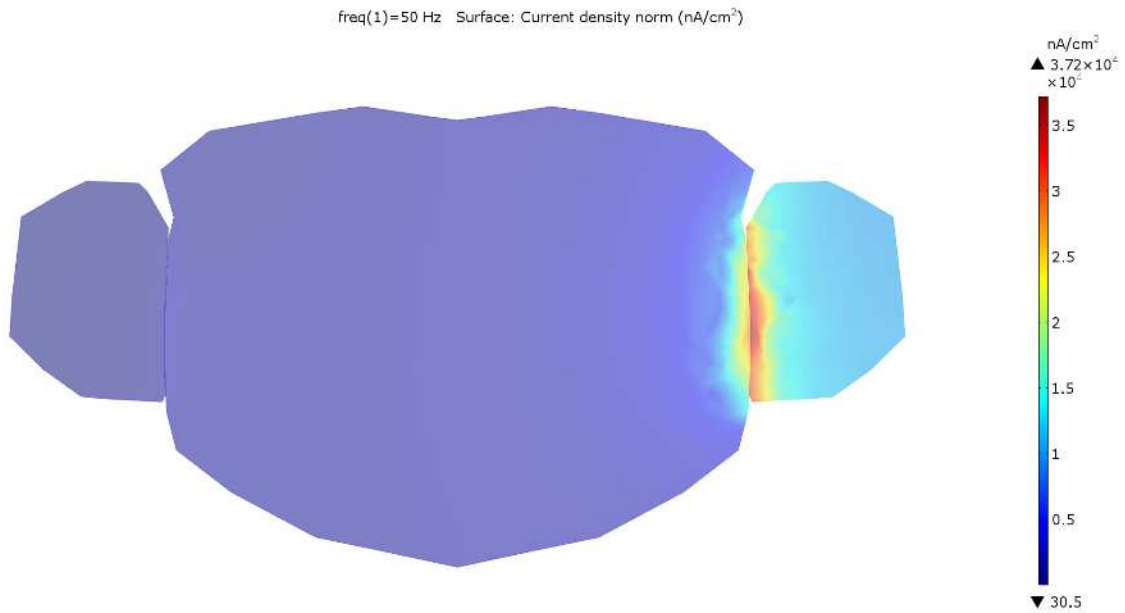


Figuur E-B-1 Hoofd Max = 5,03 nA /cm²

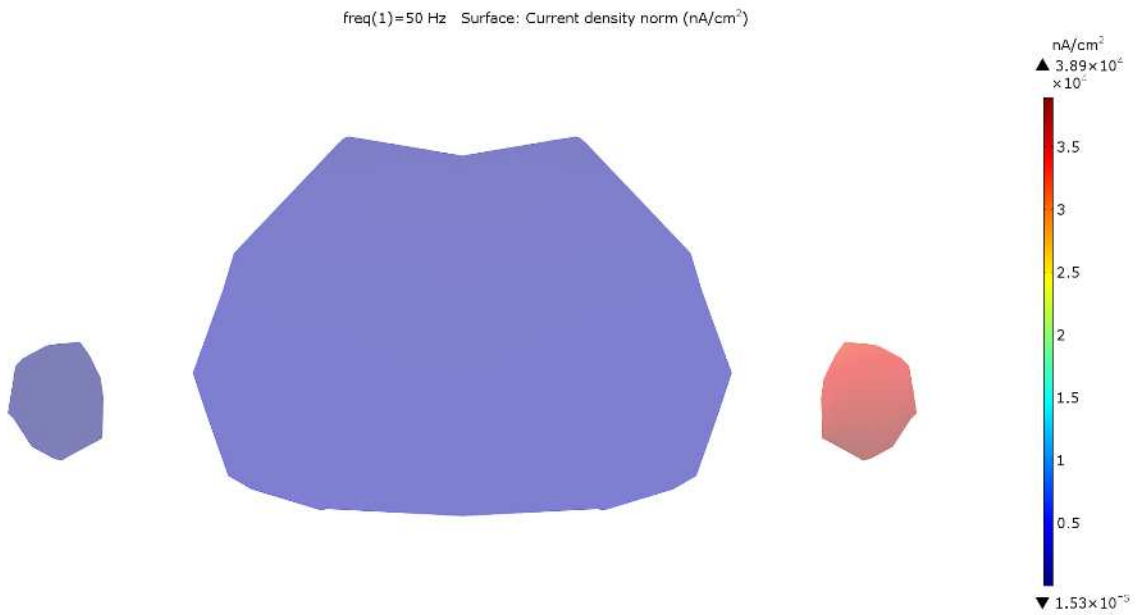
freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-B-2 Hals Max = 1,27 μA /cm². Blauw in het midden van de hals is 336 nA /cm²



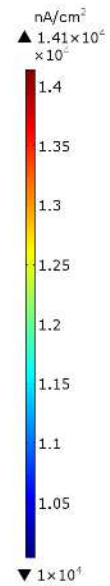
Figuur E-B-3 Torso Max = 37,2 nA /cm². Blauw op de positie van het hart is 1722 nA /cm²



Figuur E-B-4 Bekken Max = 38,9 μA /cm². Blauw in het bekken is 2012 nA /cm²



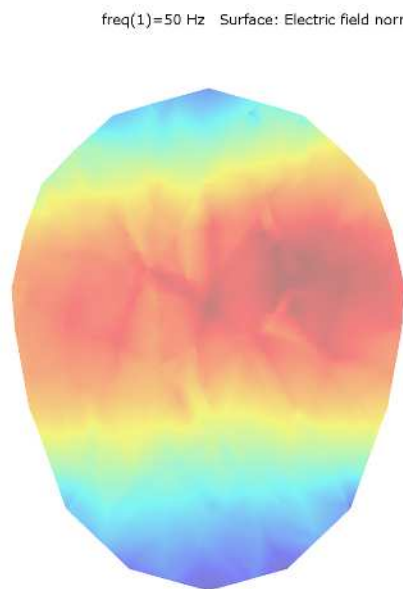
freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



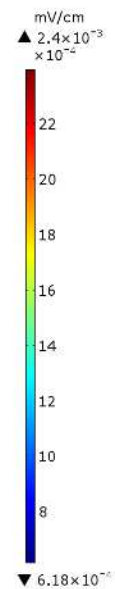
Figuur E-B-5 Enkel Max = 14,1 mA /cm². Blauw in de enkel is 10348 nA /cm²

E-B.2 Elektrisch veld - volwassen contactstroom 1 mA

Figuren E-B-6 t/m B-10 tonen het elektrisch veld in verschillende delen van het lichaam van een mens (volwassene) die in contact komt (linkerhand) met een contactstroom van 1 mA.

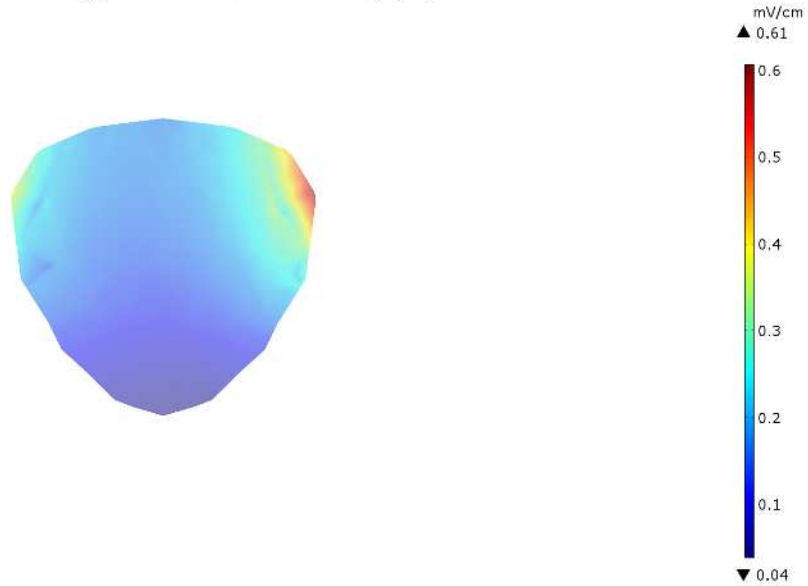


freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)



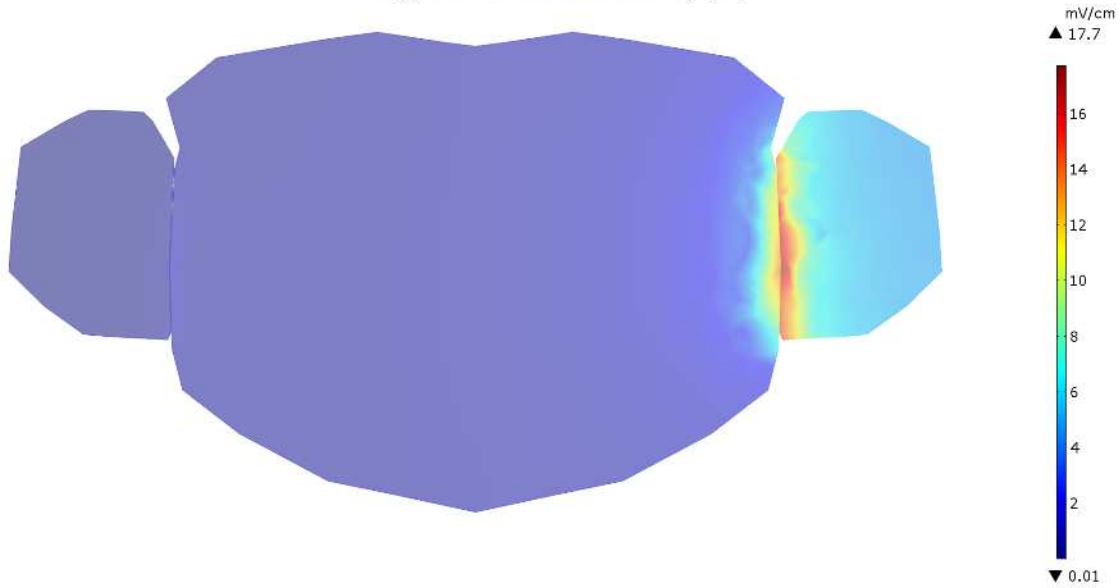
Figuur E-B-6 Hoofd Max = 2,4 μV/cm

freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)



Figuur E-B-7 Hals Max = 0,61 mV/cm. Blauw in de hals = 0,14 mV/cm

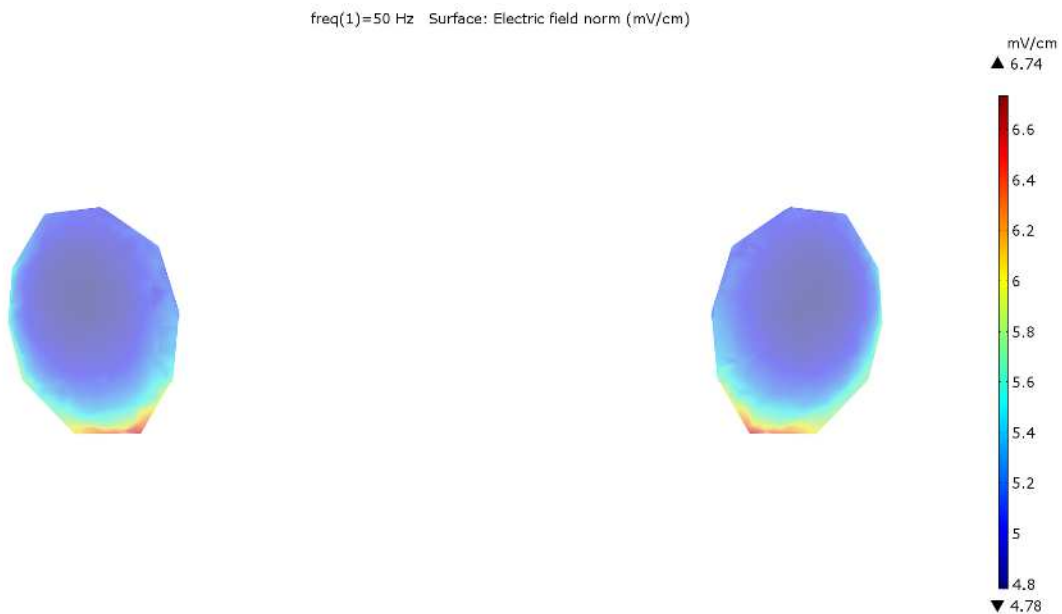
freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)



Figuur E-B-8 Torso Max = 17,7 mV/cm. Blauw op hartlocatie Max = 0,86 mV/cm



Figuur E-B-9 Bekken Max = 18,5 mV/cm. Blauw - bekken Max = 0,93 mV/cm

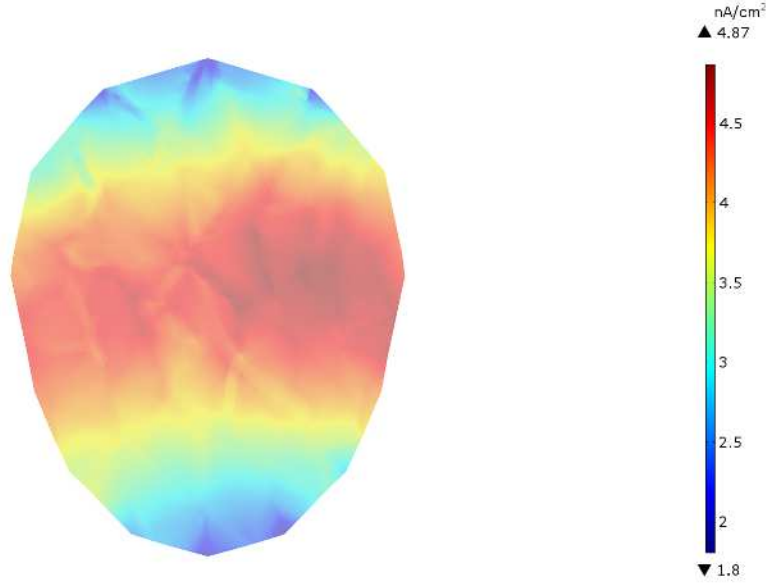


Figuur E-B-10 Enkel Max = 6,7 mV/cm. Enkel Blauw Max = 4,8 mV/cm

E-B.3 Stroomdichtheid - Kindercontactstroom 1 mA

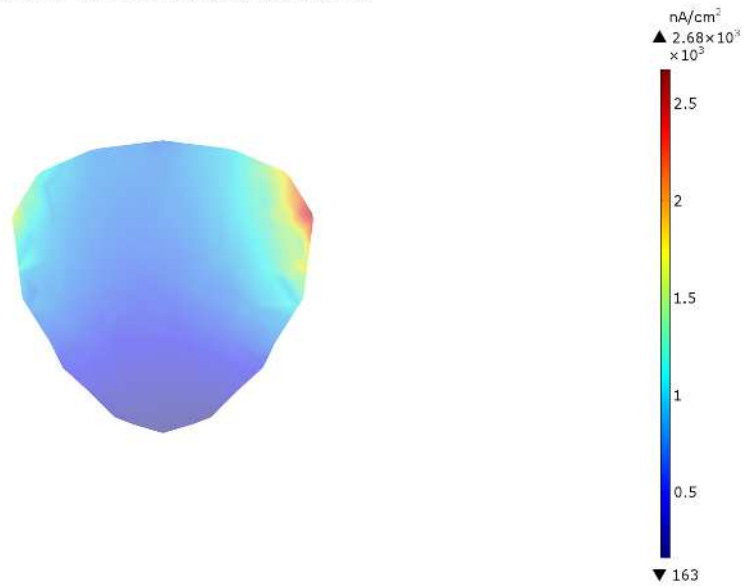
Figuren E-B-11 tot en met B-15 tonen de stroomdichtheid in verschillende delen van het lichaam van een mens (kind) die in contact komt (linkerhand) met een contactstroom van 1 mA.

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)

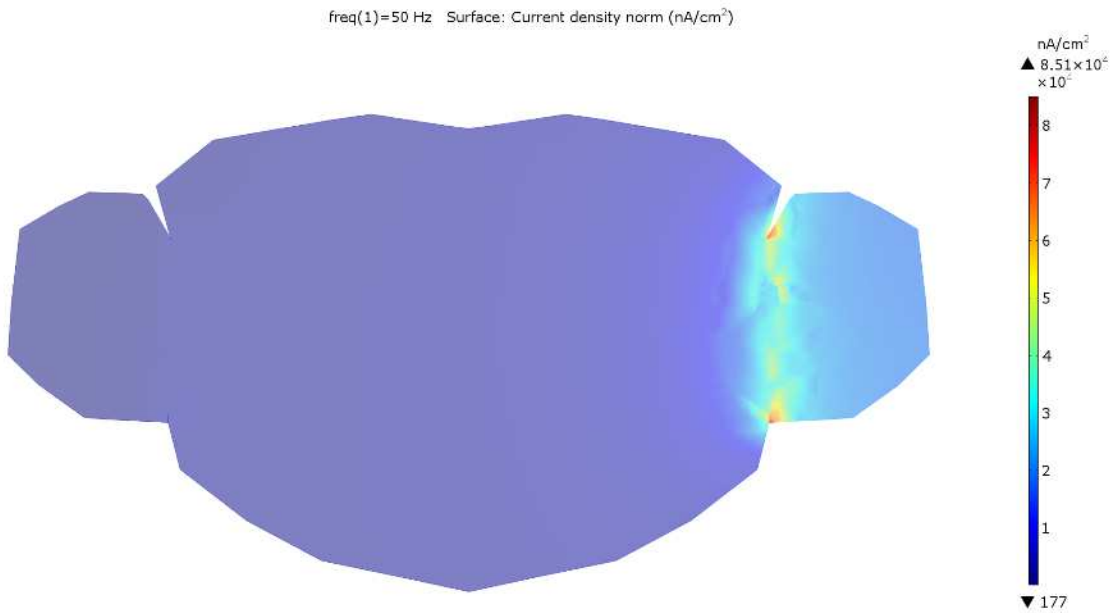


Figuur E-B-11 Hoofd Max = 4,87 nA /cm²

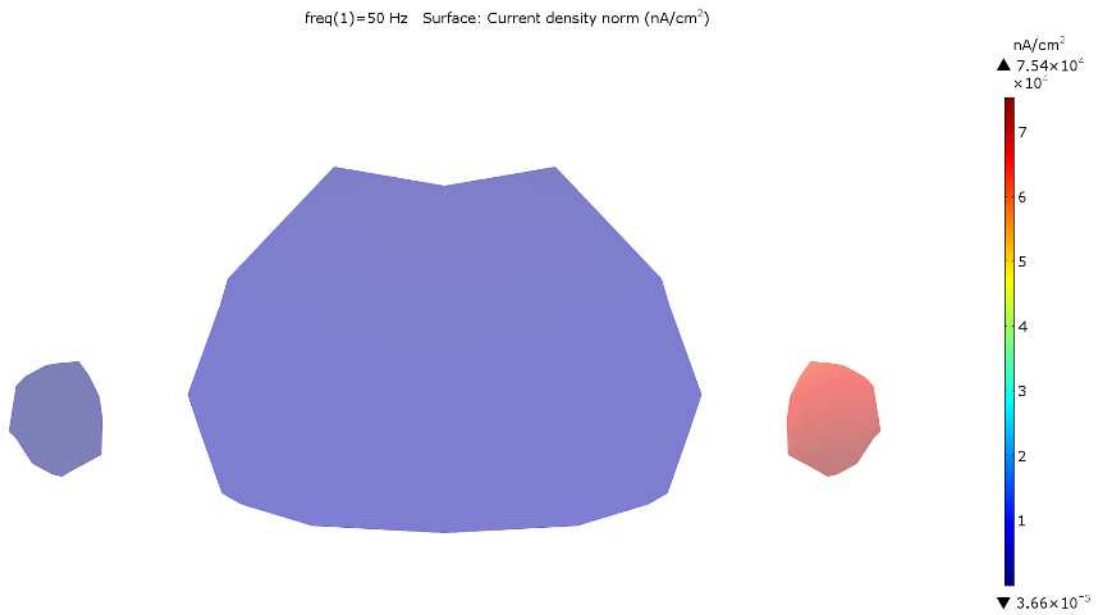
freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-B-12 Hals Max = 2,68 μA /cm². Hals Blauw Max = 610 nA /cm²

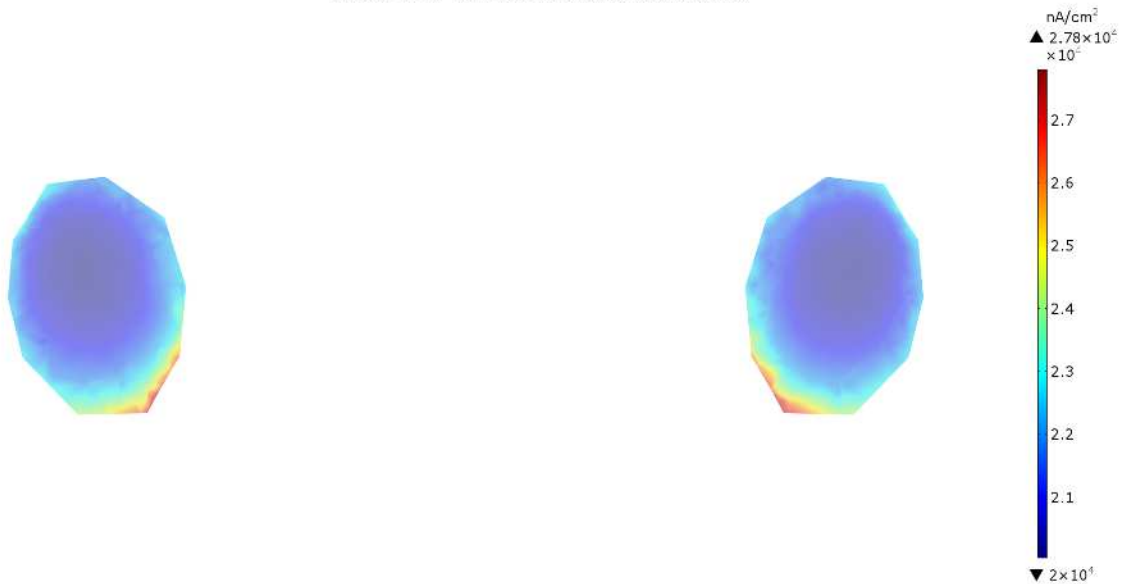


Figuur E-B-13 Torso Max = 85,1 μA /cm². Torso Blauw op hartlocatie Max = 3291 nA /cm²



Figuur E-B-14 Bekken Max = 75,4 μA /cm². Bekken Blauw Max = 3816 nA /cm²

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)

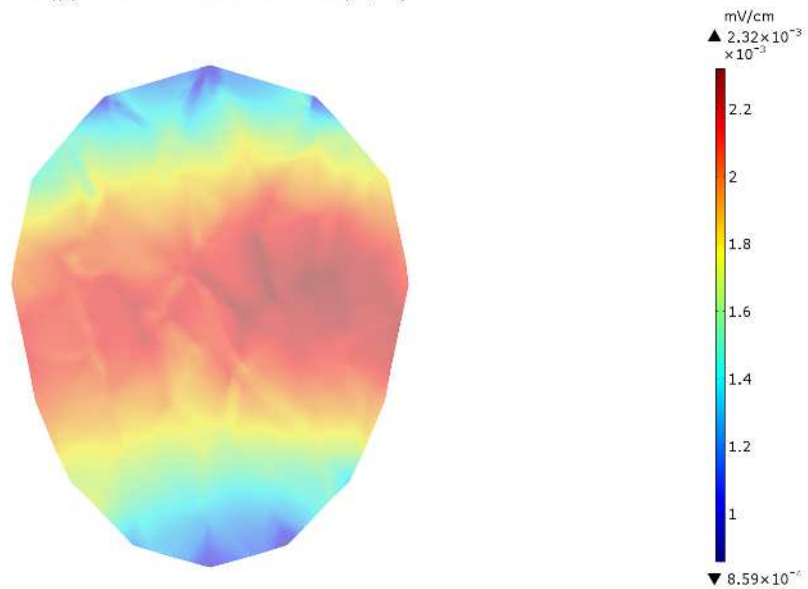


Figuur E-B-15 Enkel Max = 27,8 μ A /cm². Enkelblauw Max = 20373 nA /cm²

E-B.4 Elektrisch veld - Kindcontactstroom 1 mA

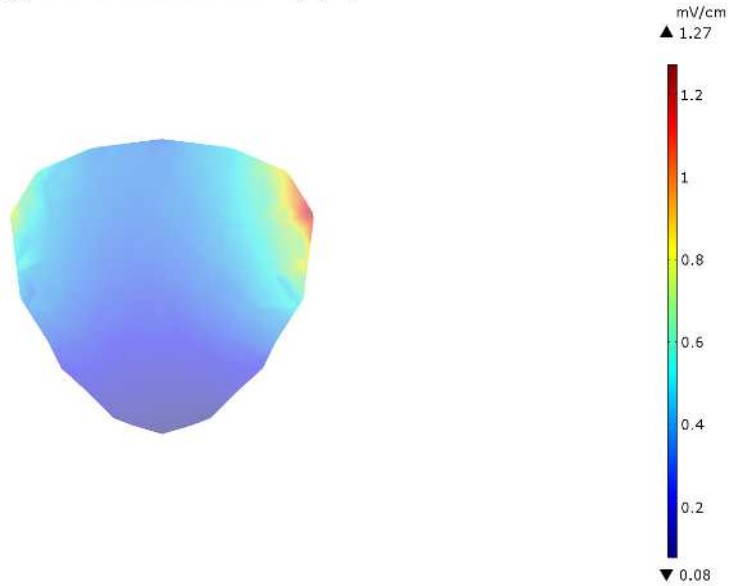
Figuren E-B-16 t/m B-20 tonen het elektrisch veld in verschillende delen van het lichaam van een mens (kind) die in contact komt (linkerhand) met een contactstroom van 1 mA.

freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)



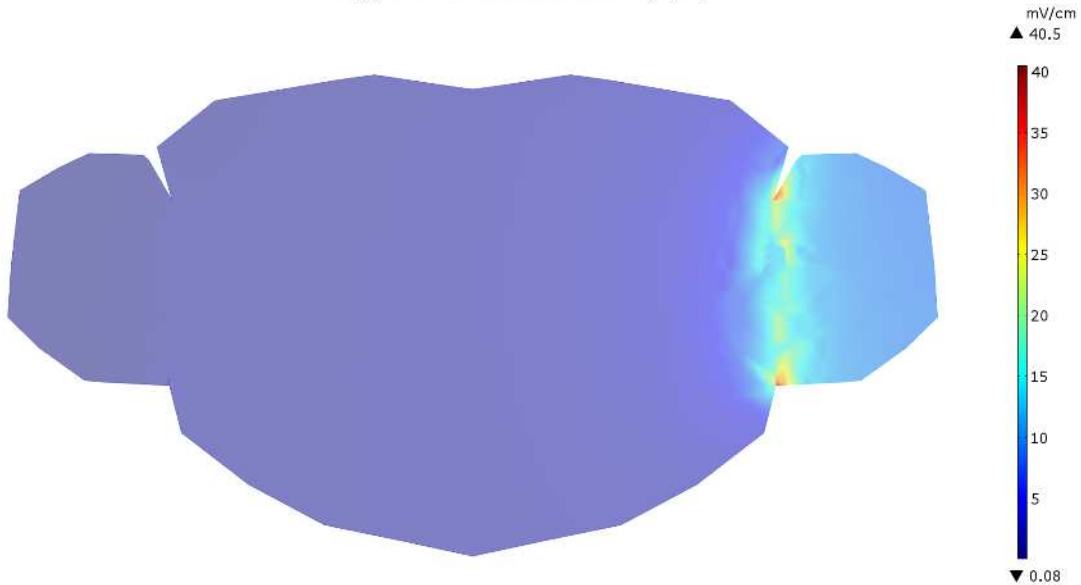
Figuur E-B-16 Hoofd Max = 2,32 μ V/cm

freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)

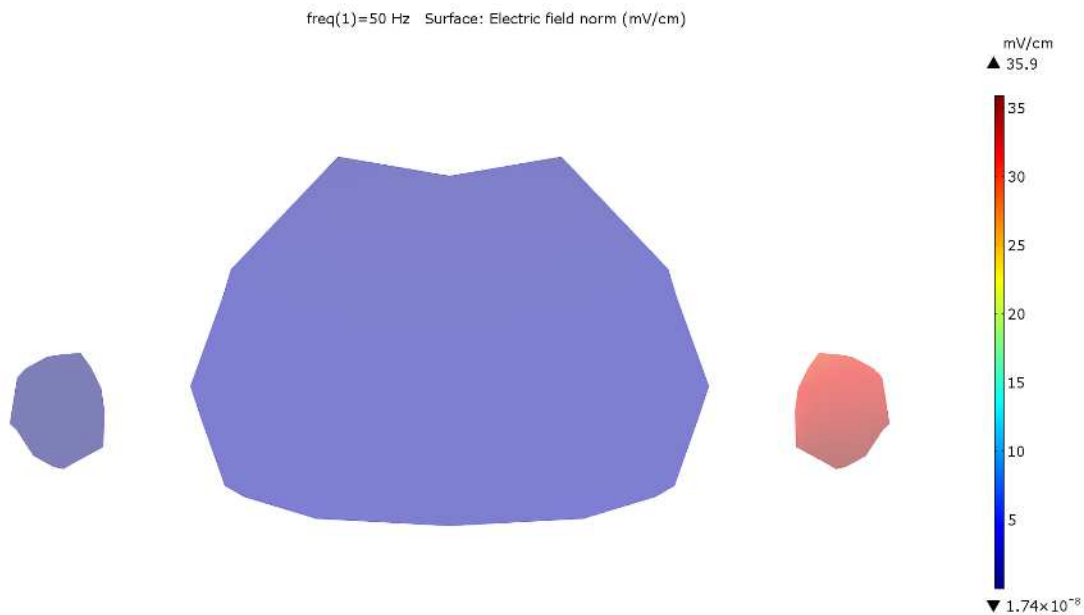


Figuur E-B-17 Hals Max = 1,27 mV/cm. Hals Blauw Max = 0,3 mV/cm

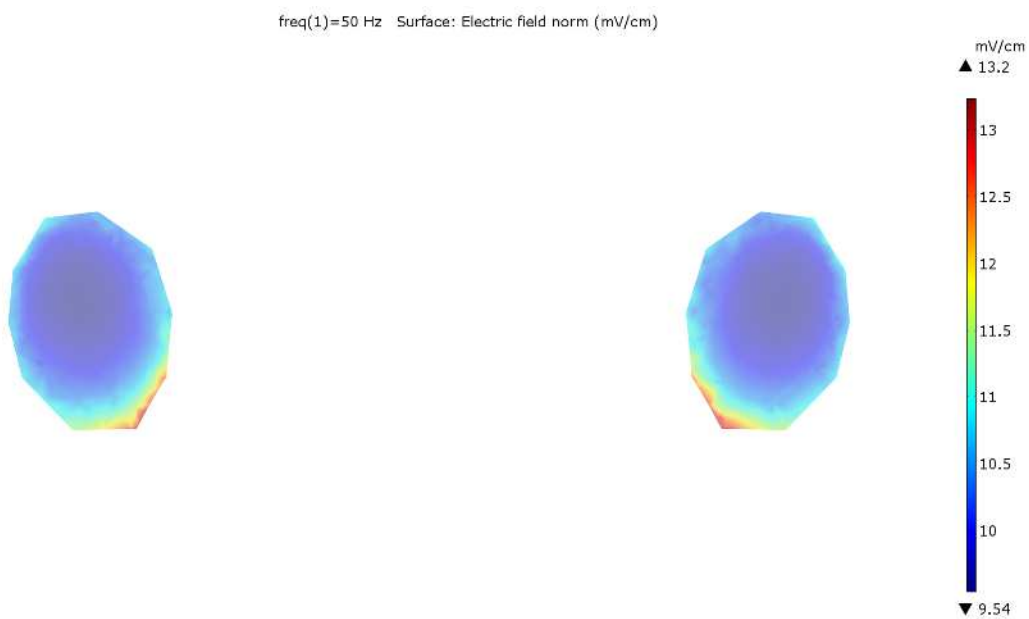
freq(1)=50 Hz Surface: Electric field norm (mV/cm)



Figuur E-B-18 Torso Max = 40,5 mV/cm. Torso Blauw op hartlocatie Max = 1,84 mV/cm



Figuur E-B-19 Bekken Max = 35,9 mV/cm. Bekken Blauw Max = 1,82 mV/cm



Figuur E-B-20: Enkel Max = 13,2 mV/cm. Enkel Blauw Max = 9,85 mV/cm

E-B.5 Samenvatting Lichaamsstroomdichtheid en elektrisch veld - contactstroom 1 mA

Tabel E-B-1 geeft een overzicht van de berekende stroomdichtheid op basis van de modellen voor mensen en kinderen en het elektrisch veld in het lichaam.

Tabel E-B-1 Samenvatting van de berekende stroomdichtheid en het elektrisch veld in het lichaam op basis van de modellen voor mensen en kinderen.

VOLWASSEN

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (μV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	5,03	2,4	Maxima;
2	Hals	336	140	Maxima = 1,27 μA/cm ² ; 610 μV/cm
3	Torso (positie van het hart)	1 722	860	Maxima = 37,2 μA/cm ² ; 17 700 μV/cm
4	Bekken	2 012	930	Maxima = 38,9 μA/cm ² ; 18 500 μV/cm
5	Enkel	10 348	4 800	Maxima = 14,1 μA/cm ² ; 6 700 μV/cm
	Gemiddeld	2 885	1 347	
	Gemiddelde exclusief enkel	1 019	483	

KINDER

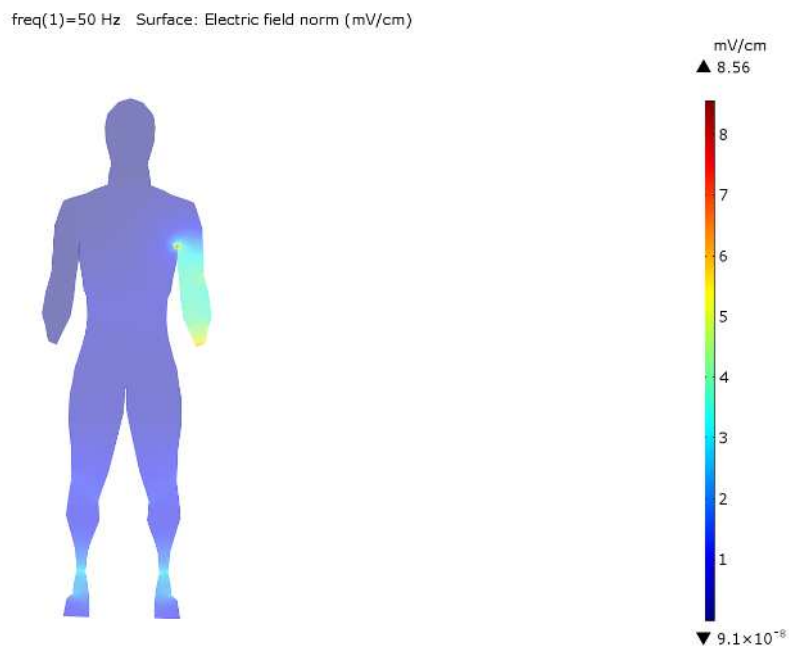
Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (μV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	4,9	2,32	Maxima;
2	Hals	610	300	Maxima = 2,68 μA/cm ² ; 1 270 μV/cm
3	Torso (positie van het hart)	3 291	1 840	Maxima = 85,1 μA/cm ² ; 40 500 μV/cm
4	Bekken	3 816	1 820	Maxima = 75,4 μA/cm ² ; 35 900 μV/cm
5	Enkel	20 373	9 850	Maxima = 27,8 μA/cm ² ; 13 200 μV/cm
	Gemiddeld	5 619	2 763	
	Gemiddelde exclusief enkel	1 931	991	

Uit Tabel E-B-1 blijkt het volgende:

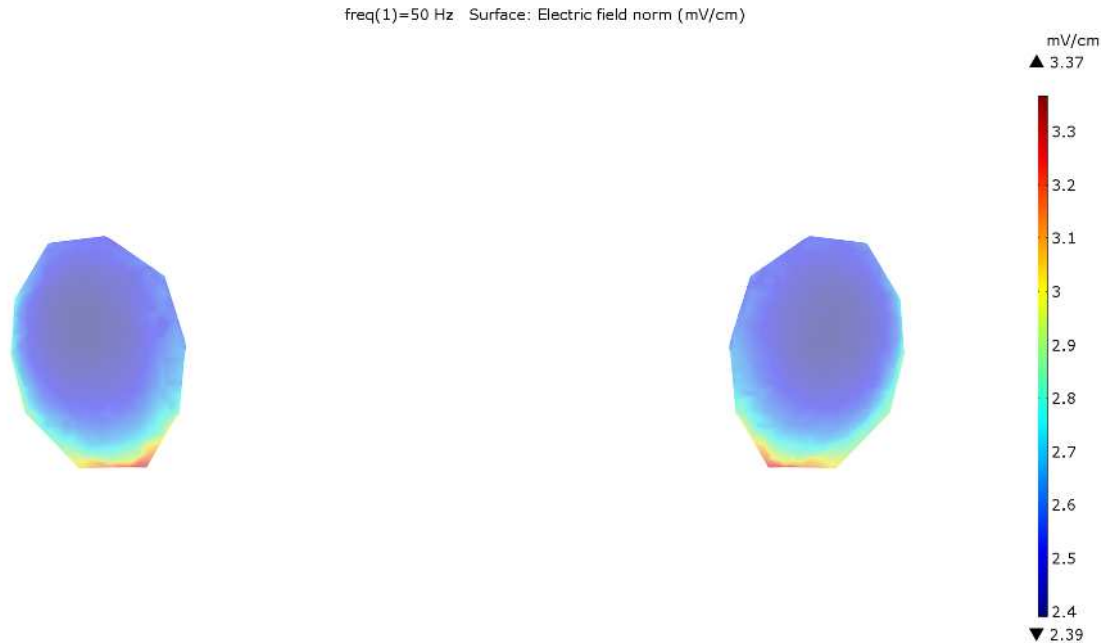
- Bij een contactstroom van 1 mA van hand tot voet is de stroomdichtheid bij het kind groter dan bij de volwassene (dit is het tegenovergestelde van de bevinding bij de persoon die in water is ondergedompeld).
- De drempelwaarde voor ademhalingsstilstand (volgens Tabel 6 in Appendix D (Carghill, 2017) /8/) is 64 000 nA/cm². De stroomdichtheden die in Tabel E-B-1 hierboven zijn genoteerd, liggen ruim binnen deze laatste drempelwaarde.

E-B.6 Contactstroom Schaalbaarheid

De Figuren E-B-21 en F-22 tonen de lineaire schaalverdeling van de stroomdichtheid bij een contactstroom van 0,5 mA. Dit laatste kan worden vergeleken met de eerder in dit Appendix besproken contactstroom van 1 mA.



Figuur E-B-21 Stroomdichtheid bij volwassenen bij een contactstroom van 0,5 mA.



Figuur E-B-22 Elektrisch veld in de enkel van het volwassen model bij een contactstroom van 0,5 mA (Vergelijk met Figuur E-B-10).

Uit Figuur E-B-22 blijkt dat het elektrische veld lineair schaalt met de contactstroom.

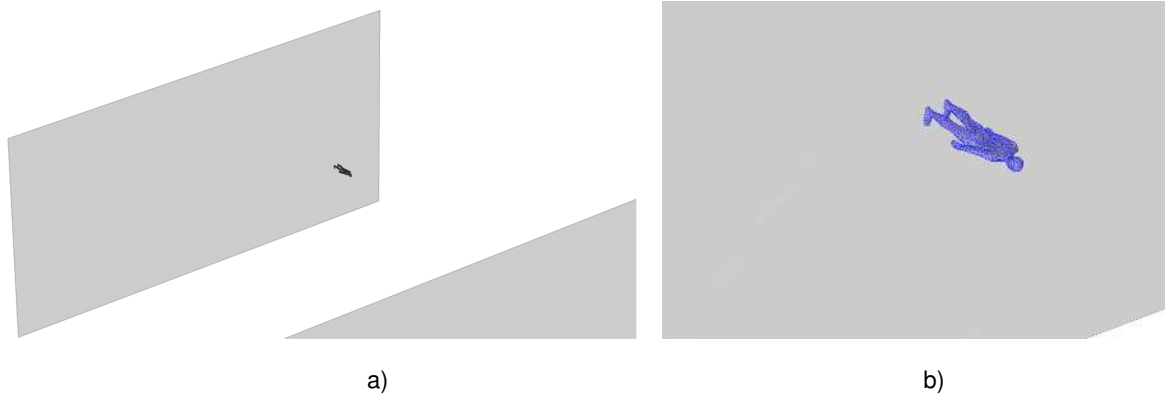
Aanhangsel C bij appendix E: MODELKALIBRERING - 1 V/m IN-WATER ELEKTRISCH VELD

E-C.1 Modelopstelling - Model voor volwassenen in een uniform elektrisch veld van 1 V/m in het water

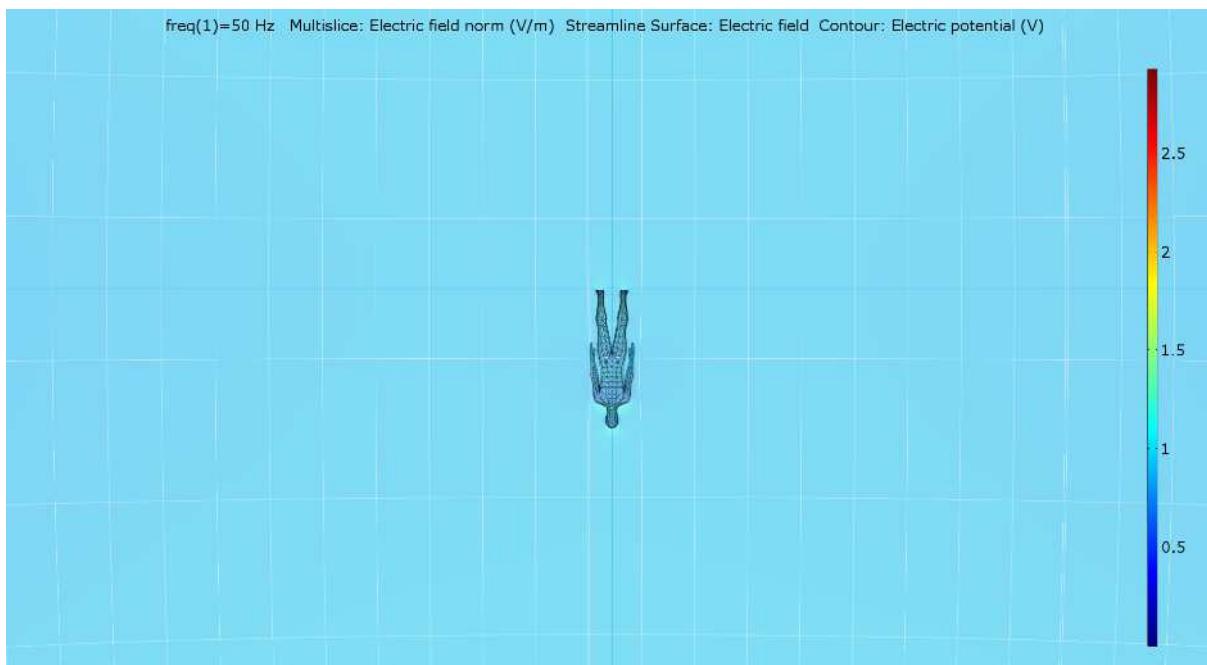
Figuur E-C-1 toont de zwemmer tussen 2 verticale, onder spanning staande grenzen om een elektrisch veld van 1 V/m aan te brengen op basis van het volgende:

- De bovenkant van de rug van de zwemmer bevindt zich 200 mm onder het wateroppervlak;
- Menselijk geleidingsvermogen = 0,21 S/m
- Geleidbaarheid zoet water = 0,1 S/m

Figuur E-C-2 toont het uniforme elektrische veld in het water.



Figuur E-C-1 Volwassen model in water in een uniform elektrisch veld.

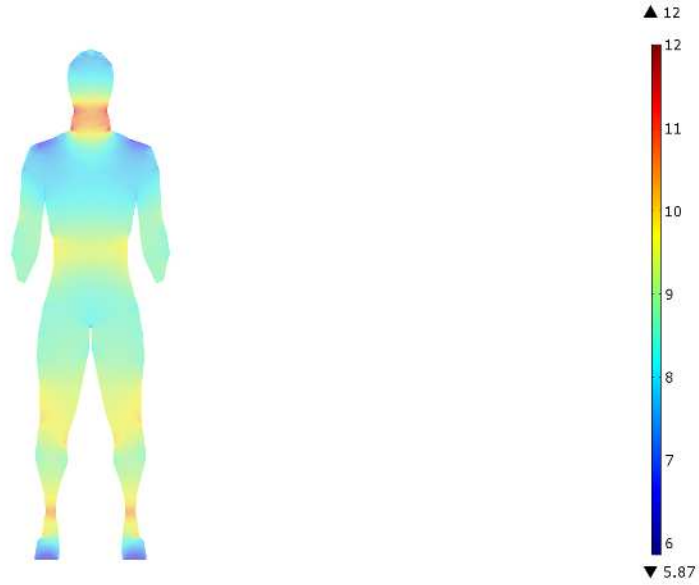


Figuur E-C-2 Uniform elektrisch veld in het water.

E-C.2 Volwassen in 1 V/m uniform elektrisch veld in zoet water

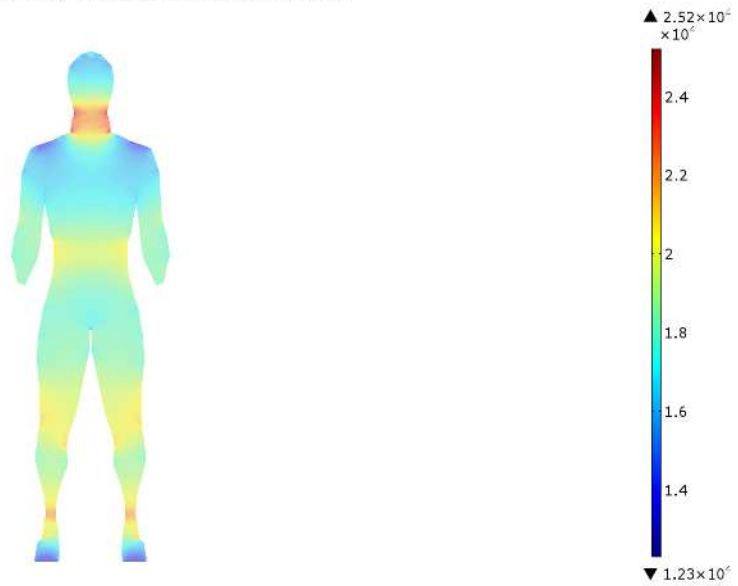
Figuur E-C-3 tot en met E-C-5 tonen het elektrisch veld in het lichaam, de stroomdichtheid en de elektrisch potentiaal over de mens in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

freq(1)=50 Hz Slice: Electric field norm (mV/cm)



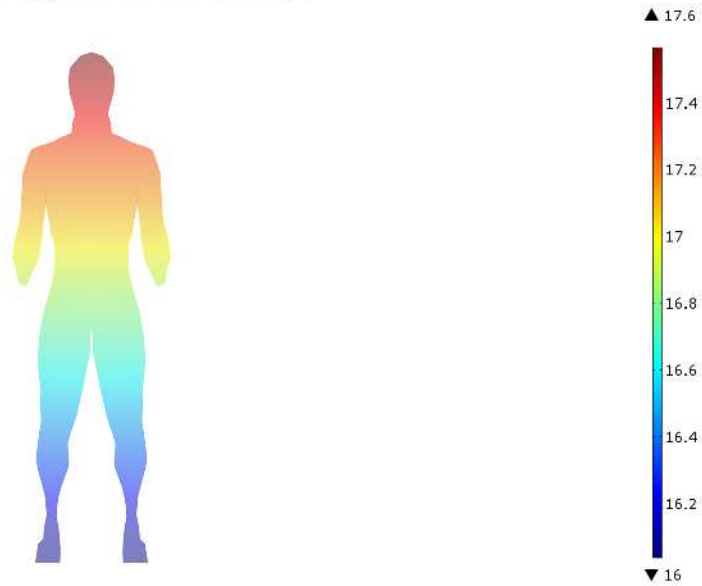
Figuur E-C-3 Elektrisch veld in het lichaam van de volwassene in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

freq(1)=50 Hz Slice: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-C-4 Stroomdichtheid in het lichaam van de volwassene in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

freq(1)=50 Hz Slice: Electric potential (V)



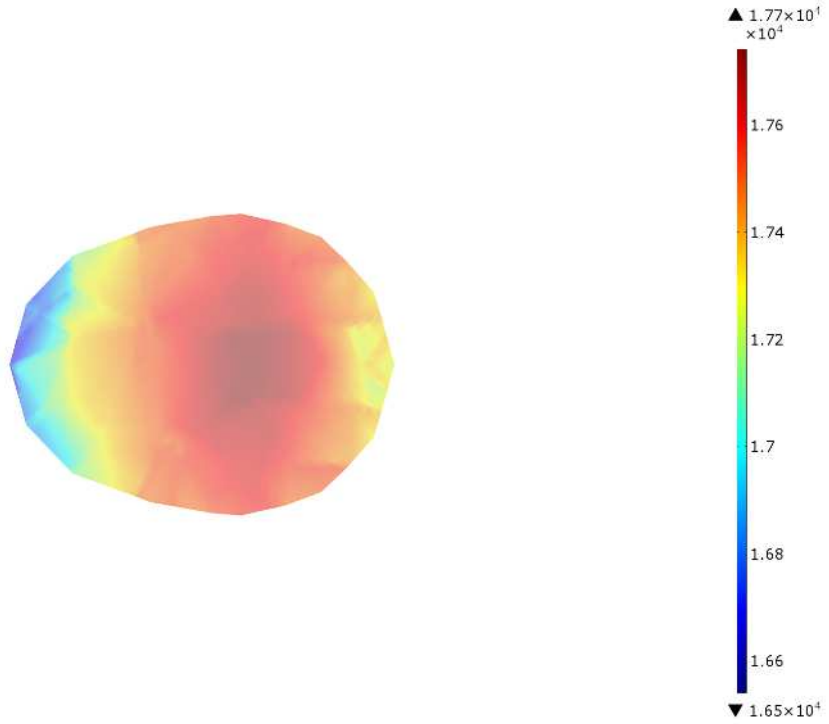
Figuur E-C-5 Elektrische potentiaal over de volwassene in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

Uit Figuur E-C-5 blijkt het volgende:

- $17,6 \text{ V} - 16 \text{ V} = 1,6 \text{ V}$
- De volwassene is 1,72 m lang
- Dus, 0,93 V/m elektrisch veld

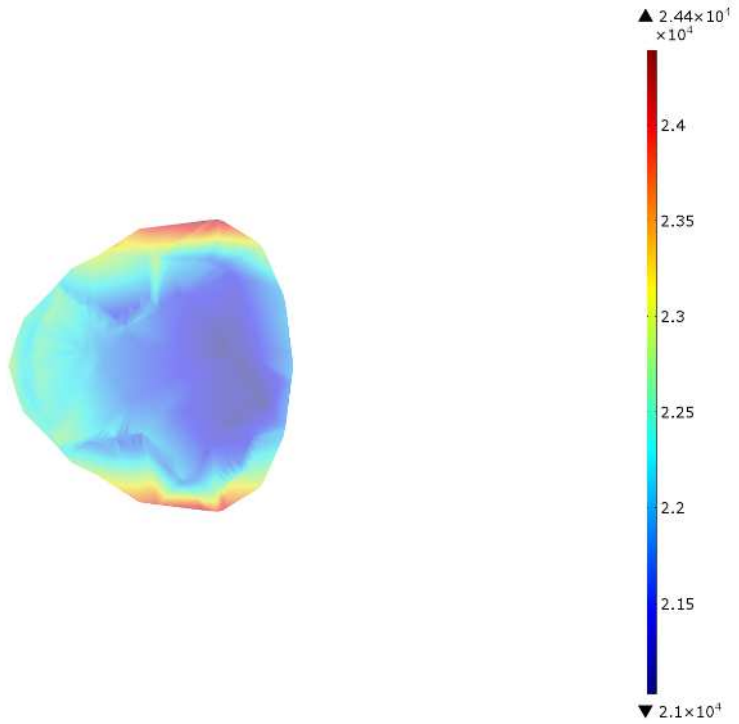
Figuur E-C-6 tot en met E-C-10 tonen de stroomdichtheid in delen van het lichaam van de volwassene bij onderdomping in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



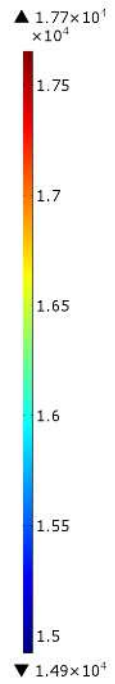
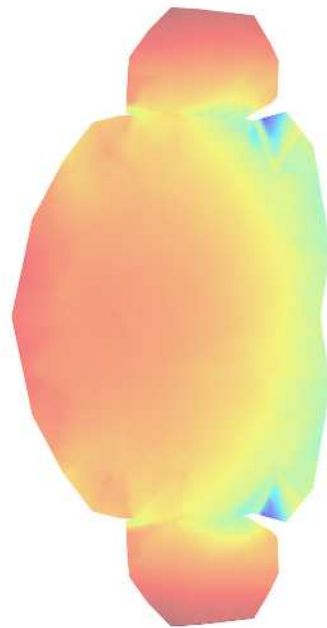
Figuur E-C-6 Hoogte - 1.607 m

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



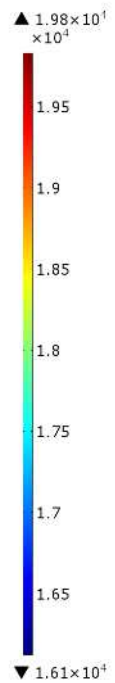
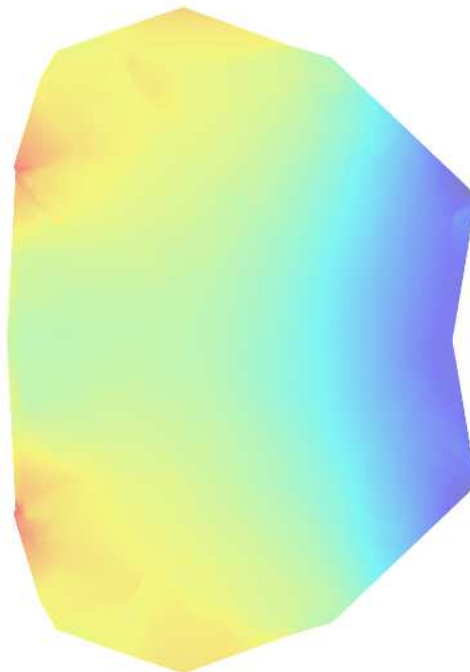
Figuur E-C-7 Hals - 1,46 m. Blauw gebied = 21 400 nA /cm²

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)

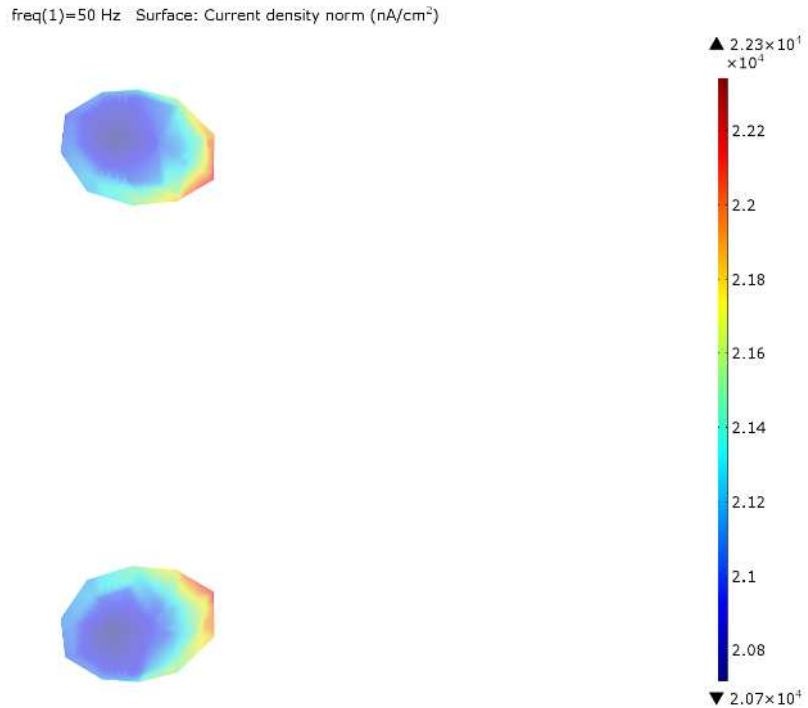


Figuur E-C-8 Torso - 1.255 m. 17115 nA/cm² in het hartgebied

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



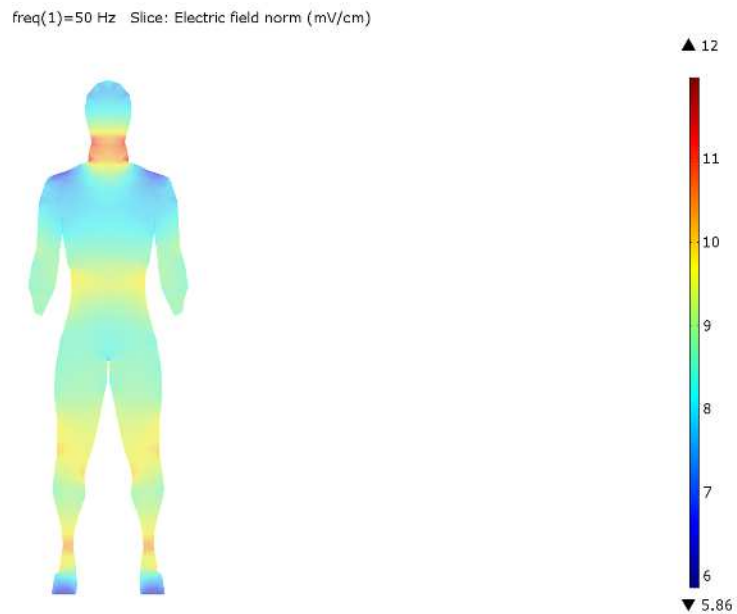
Figuur E-C-9 Bekken - 0,9 m. 18 978 nA/cm² in het middengebied



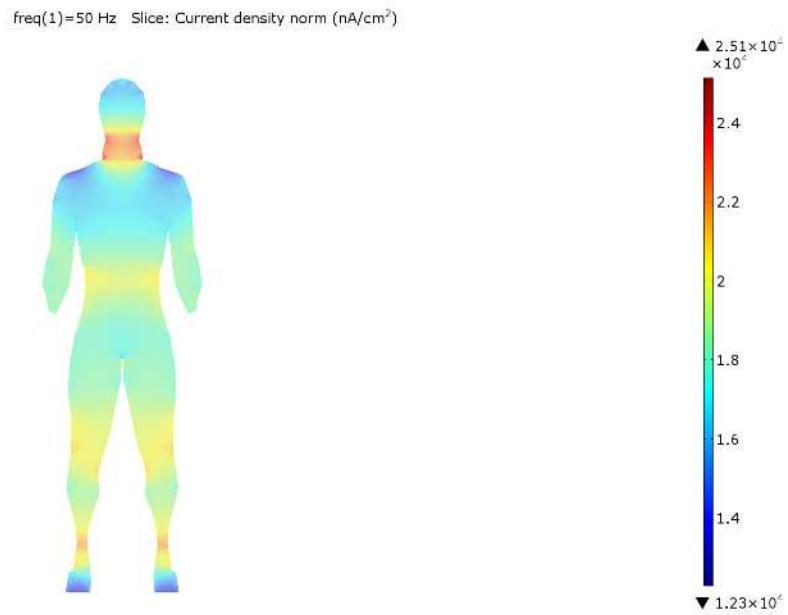
Figuur E-C-10 Enkel - 0,176 m. 20 880 nA/cm² in het blauwe gebied

E-C.3 Kind in 1 V/m uniform elektrisch veld in zoet water

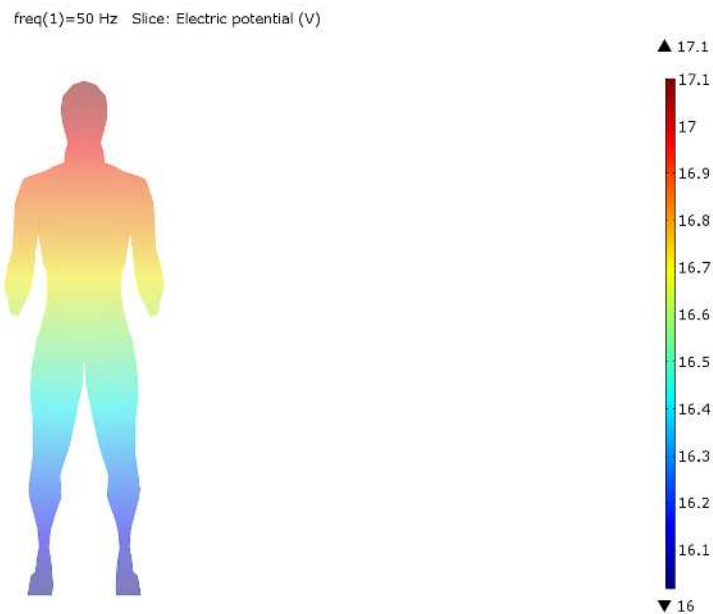
Figuren G-11 tot en met E-C-13 tonen het elektrische veld in het lichaam, de stroomdichtheid en de elektrische potentiaal over het kind in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.



Figuur E-C-11 Elektrisch veld in het lichaam van het kind in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.



Figuur E-C-12 Stroomdichtheid in het lichaam van het kind in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

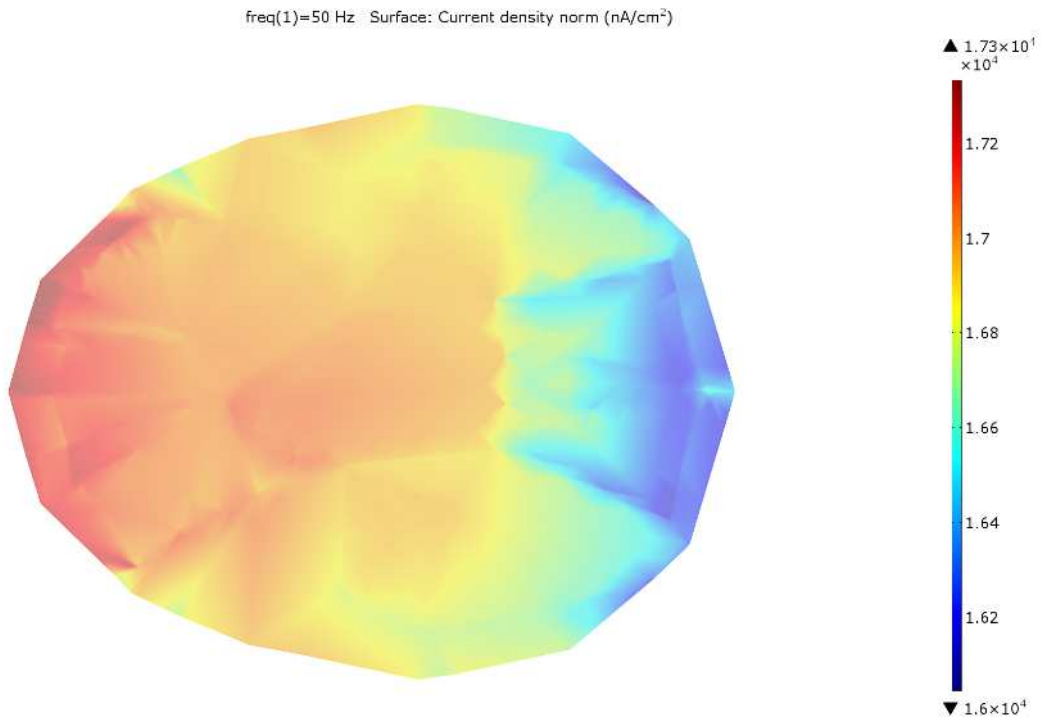


Figuur E-C-13 Elektrische potentiaal over het kind in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.

Uit Figuur E-C-13 blijkt het volgende:

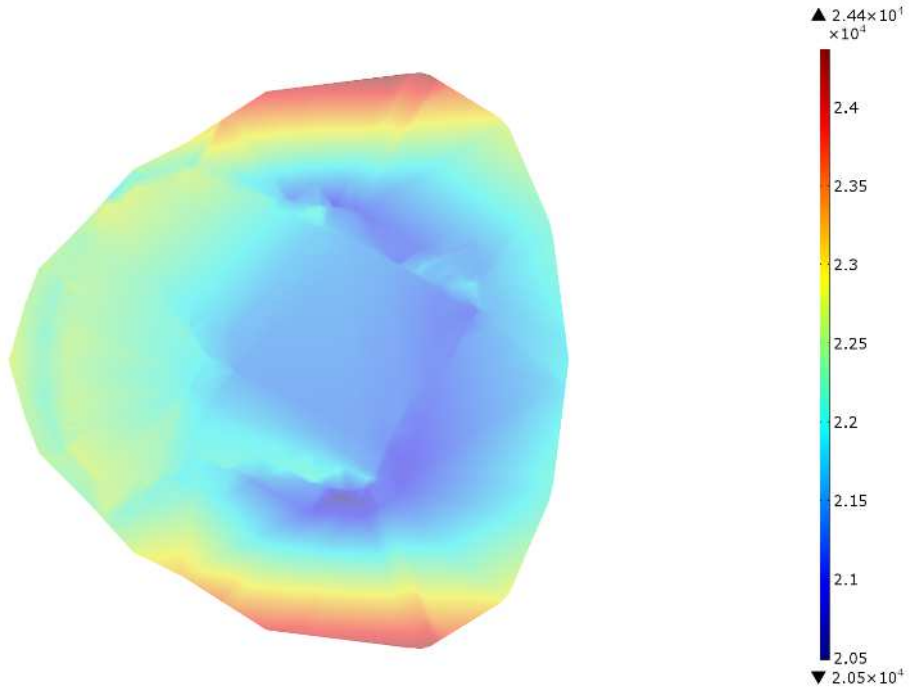
- 17,1 V - 16 V = 1,1 V
- Het kind is 1,22 m lang
- Dus, 0,9 V/m elektrisch veld

Figuren G-14 t/m G-18 tonen de stroomdichtheid in delen van het lichaam van het kind bij onderdompeling in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.



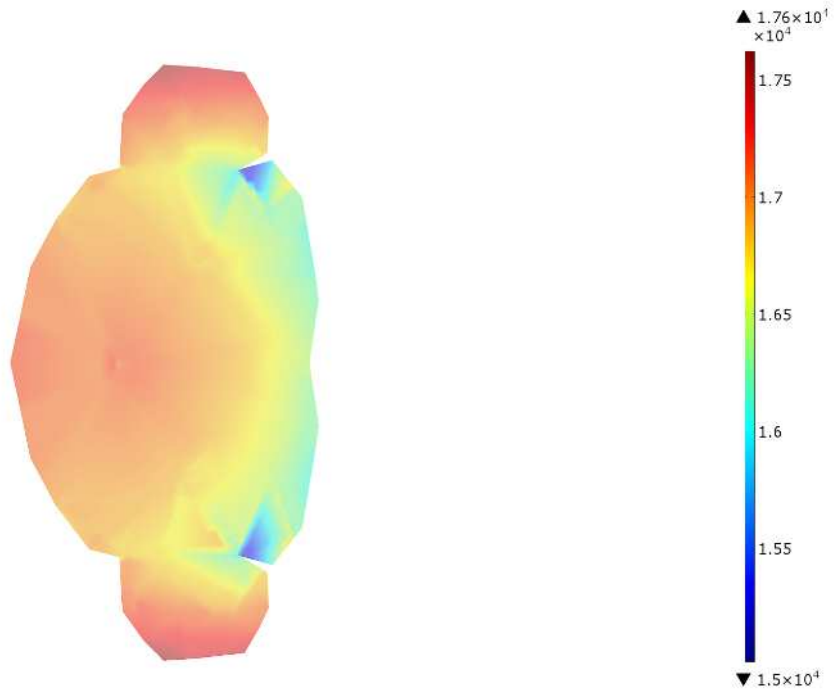
Figuur E-C-14 Hoofd - 1,15 m

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



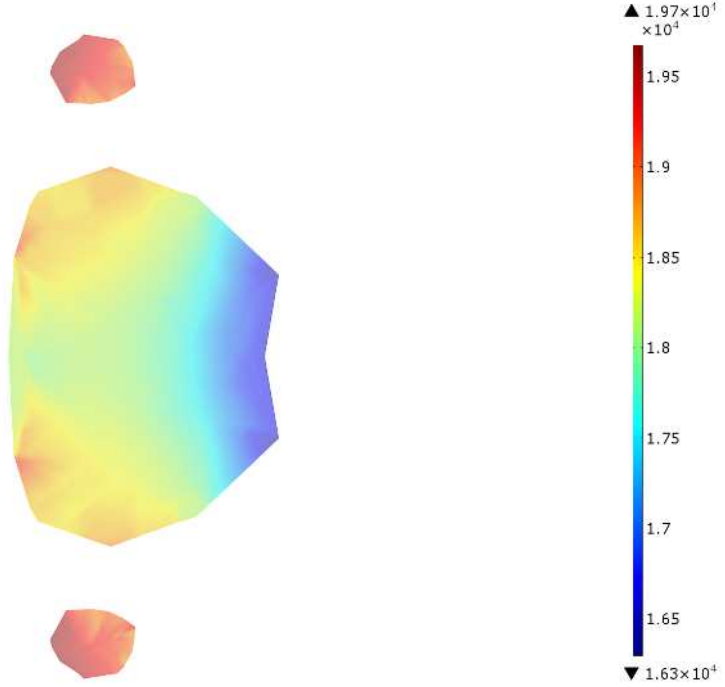
Figuur E-C-14 Hals - 1.025 m. Blauw = 21341 nA/cm²

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



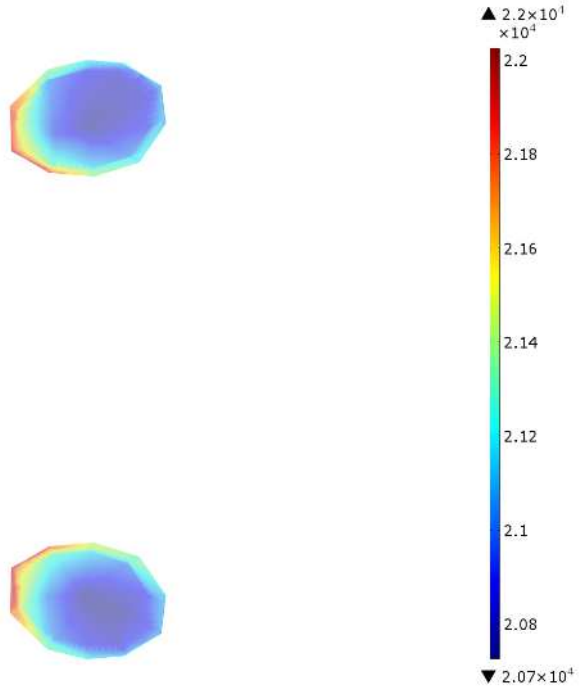
Figuur E-C-14 Torso - 0,885 m. Hartstreek = 17038 nA/cm²

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-C-15 Bekken - 0,631 m. Geel centrum = 18 121 nA/cm²

freq(1)=50 Hz Surface: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-C-16 Enkel - 0,113 m. Blauw centrum = 20 773 nA/cm²

E-C.4 Samenvatting - Bevindingen: Model in 1 V/m uniform elektrisch veld in zoet water

Tabel E-C-1 geeft een overzicht van de op basis van de modellen voor mensen en kinderen berekende stroomdichtheid en het elektrisch veld in het lichaam.

Tabel E-C-1 Samenvatting van de berekende stroomdichtheid en het elektrisch veld in het lichaam op basis van de modellen voor mens en kind.

VOLWASSEN

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (μV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	1,77 x 10 ⁴		Maximum = 17,7 μA/cm ²
2	Hals	2,14 x 10 ⁴		Maximum = 24,4 μA/cm ²
3	Torso (positie van het hart)	1,71 x 10 ⁴		Maximum = 17,1 μA/cm ²
4	Bekken	1,89 x 10 ⁴		Maximum = 19,8 μA/cm ²
5	Enkel	2,09 x 10 ⁴		Maximum = 22,3 μA/cm ²
	Gemiddeld	1,92 x 10⁴		
	Gemiddelde exclusief enkel	1,88 x 10⁴		

KINDER

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (μV/cm)	Opmerkingen
1	Hoofd	1,73 x 10 ⁴		Maximum = 17,3 μA/cm ²
2	Hals	2,13 x 10 ⁴		Maximum = 24,4 μA/cm ²
3	Torso (positie van het hart)	1,70 x 10 ⁴		Maximum = 17,6 μA/cm ²
4	Bekken	1,81 x 10 ⁴		Maximum = 19,7 μA/cm ²
5	Enkel	2,08 x 10 ⁴		Maximum = 22,0 μA/cm ²
	Gemiddeld	1,89 x 10⁴		
	Gemiddelde exclusief enkel	1,84 x 10⁴		

Uit bovenstaande Tabel blijkt het volgende:

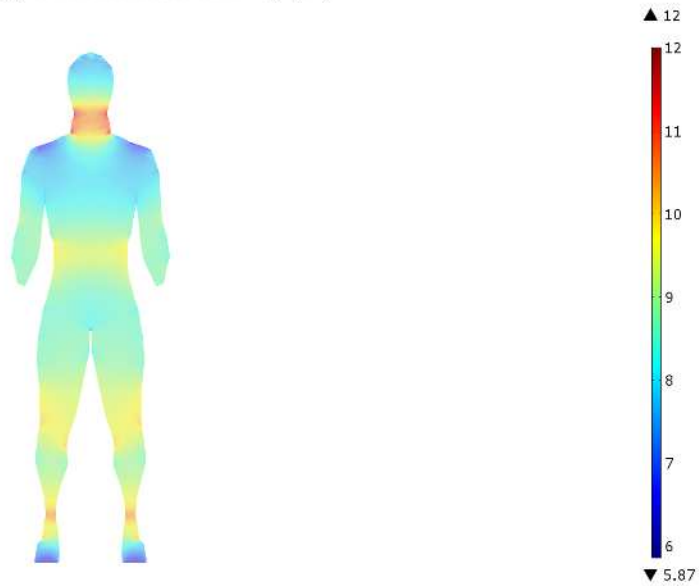
- In vergelijking met de aanrakingsstroom is de stroomverdeling door het lichaam "uniform" / gelijkmatig wanneer het lichaam in water is ondergedompeld.
- In vergelijking met het geval van de volwassene is de stroomdichtheid bij het kind iets lager dan die welke voor de volwassene is berekend. Daarom zal bij de veiligheidsbeoordeling het model voor volwassenen centraal staan.

E-C.5 Veldoriëntatie - 1 V/m uniform elektrisch veld in zoet water

E-C.5.1 Verticale oriëntatie van het elektrisch veld (van hoofd tot voeten)

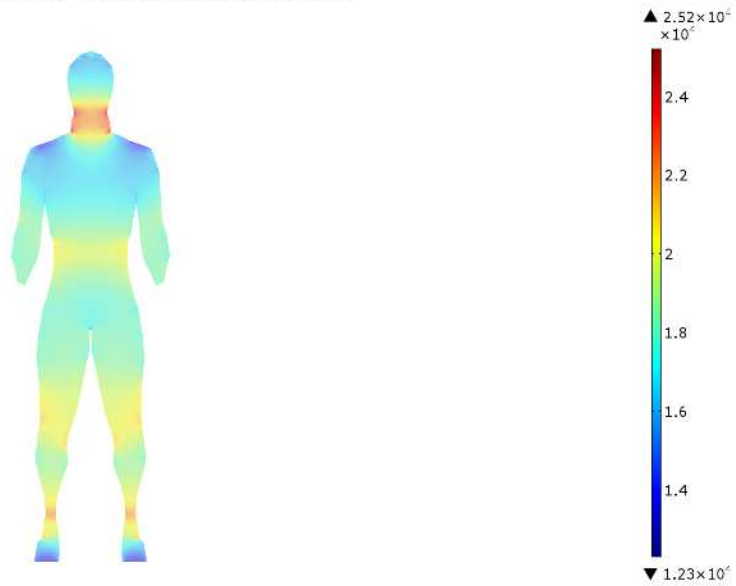
Figuren E-C-17 t/m E-C-19 tonen het elektrisch veld binnen het lichaam, de stroomdichtheid binnen het lichaam en de elektrische potentiaal over de volwassene voor de verticale oriëntatie van het elektrisch veld (van hoofd tot voeten).

freq(1)=50 Hz Slice: Electric field norm (mV/cm)



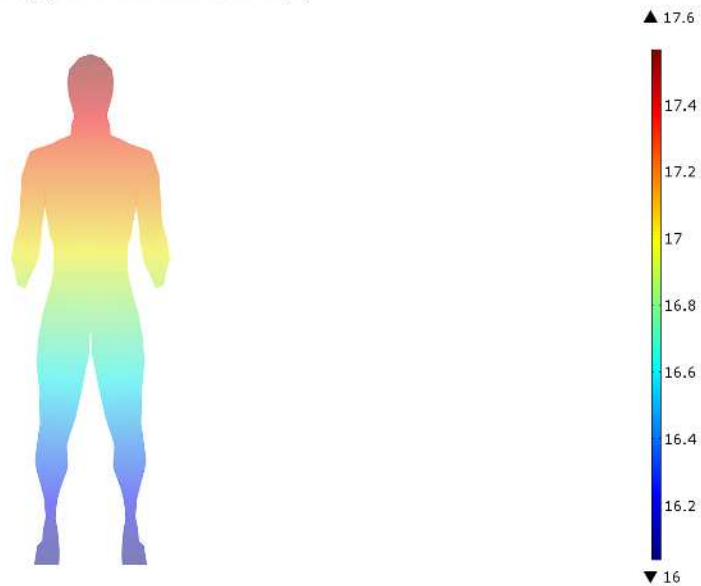
Figuur E-C-17 Elektrisch veld in het lichaam van de volwassene voor de verticale oriëntatie (van hoofd tot voeten).

freq(1)=50 Hz Slice: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-C-18 Stroomdichtheid in het lichaam van de volwassene voor de verticale oriëntatie van het elektrisch veld (van hoofd tot voeten).

freq(1)=50 Hz Slice: Electric potential (V)

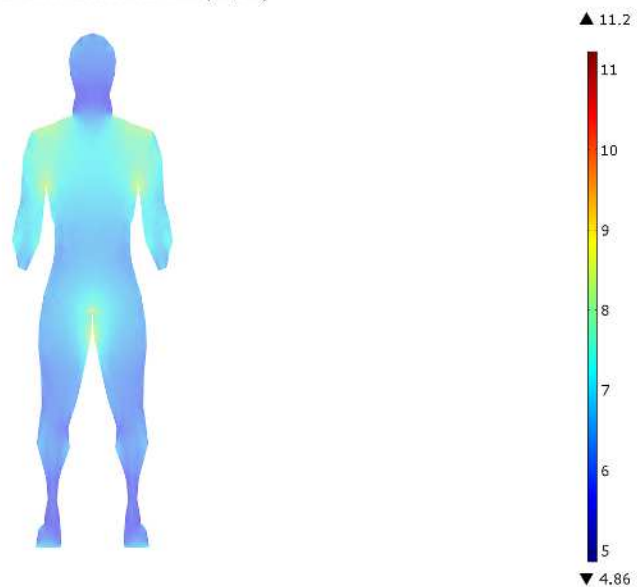


Figuur E-C-19 Elektrisch potentieel over de volwassene voor de verticale oriëntatie van het elektrisch veld (van hoofd tot voeten).

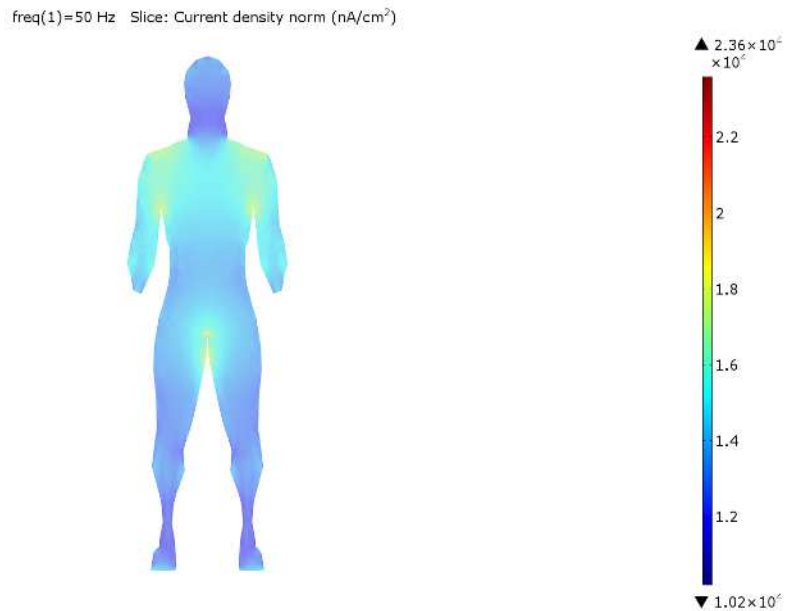
E-C.5.2 Horizontale oriëntatie (schouder aan schouder) elektrisch veld

Figuren E-C-20 t/m E-C-22 tonen het elektrisch veld in het lichaam, de stroomdichtheid en de elektrische potentiaal over de volwassene voor de horizontale oriëntatie (schouder tegen schouder) van het elektrisch veld.

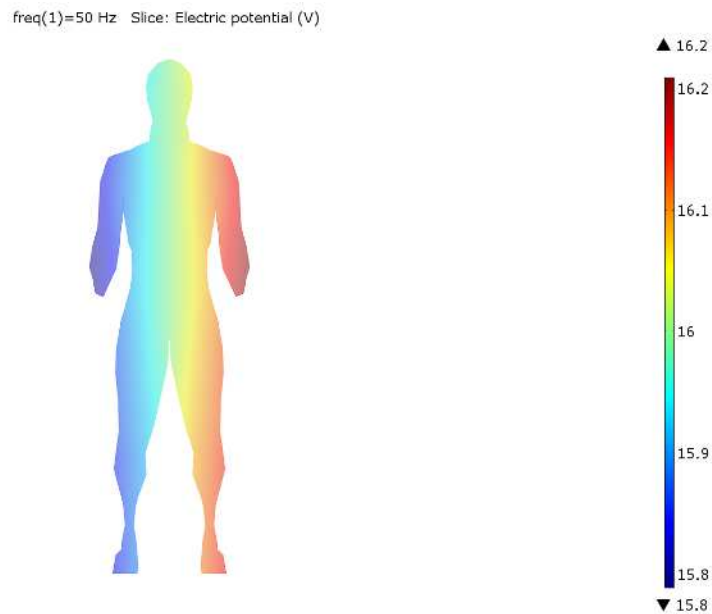
freq(1)=50 Hz Slice: Electric field norm (mV/cm)



Figuur E-C-20 Elektrisch veld in het lichaam van de volwassene voor de horizontale oriëntatie (schouder tegen schouder).



Figuur E-C-21 Stroomdichtheid in het lichaam van de volwassene voor de horizontale oriëntatie (schouder tegen schouder) van het elektrisch veld.

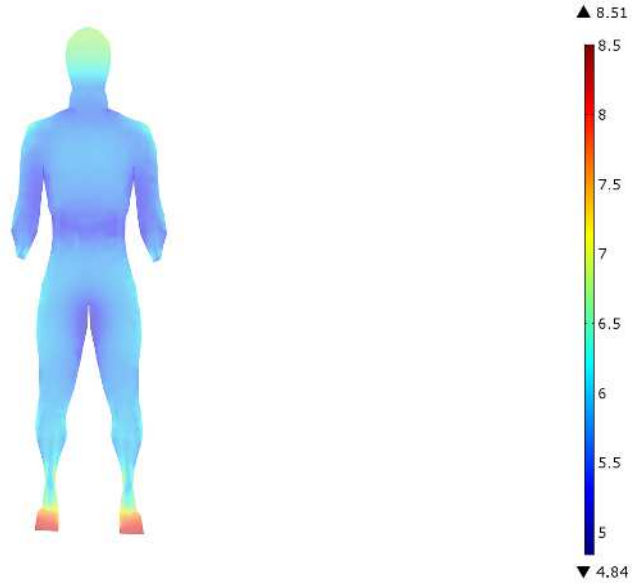


Figuur E-C-21 Elektrisch potentieel over de volwassene voor de horizontale oriëntatie (schouder tegen schouder) van het elektrisch veld.

E-C.5.3 Horizontale oriëntatie (van voor naar achter) van het elektrisch veld

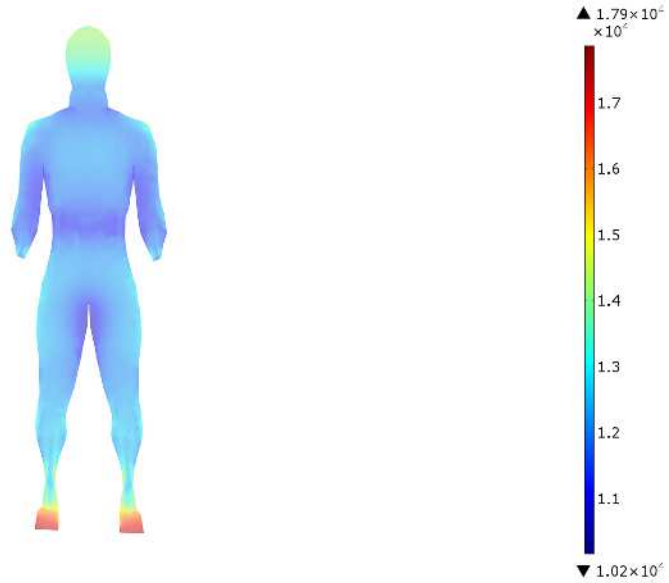
Figuur E-C-23 tot en met E-C-25 tonen het elektrisch veld in het lichaam, de stroomdichtheid in het lichaam en de elektrische potentiaal over de volwassene voor de horizontale oriëntatie (voorkant naar achterkant) van het elektrisch veld.

freq(1)=50 Hz Slice: Electric field norm (mV/cm)



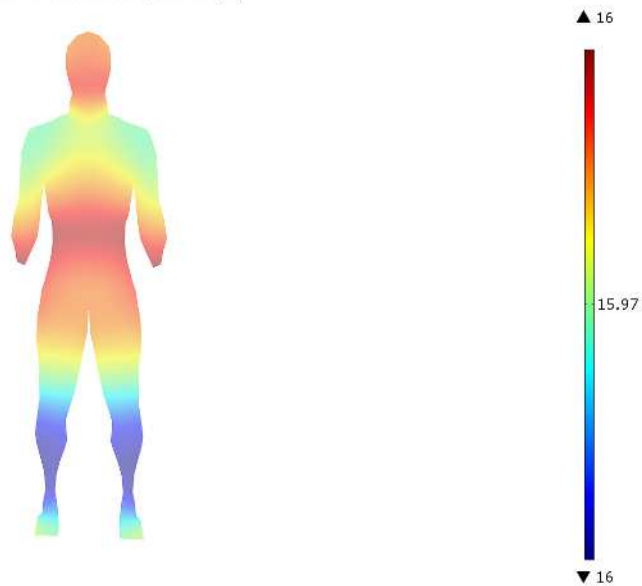
Figuur E-C-23 Elektrisch veld in het lichaam van de volwassene voor de horizontale oriëntatie (van voor naar achter).

freq(1)=50 Hz Slice: Current density norm (nA/cm²)



Figuur E-C-24 lichaamsstroomdichtheid van de volwassene voor de horizontale oriëntatie (van voor naar achter) van het elektrisch veld.

freq(1)=50 Hz Slice: Electric potential (V)



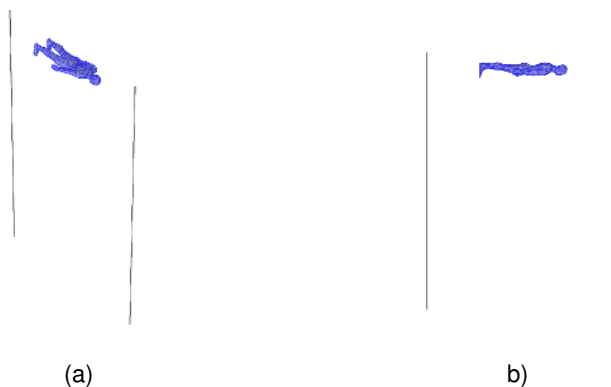
Figuur E-C-23 Elektrische potentiaal over de volwassene voor de horizontale oriëntatie (van voor naar achter) van het elektrisch veld.

E-C.6 Modelopstelling - Model voor volwassenen in een niet-uniform elektrisch veld in water

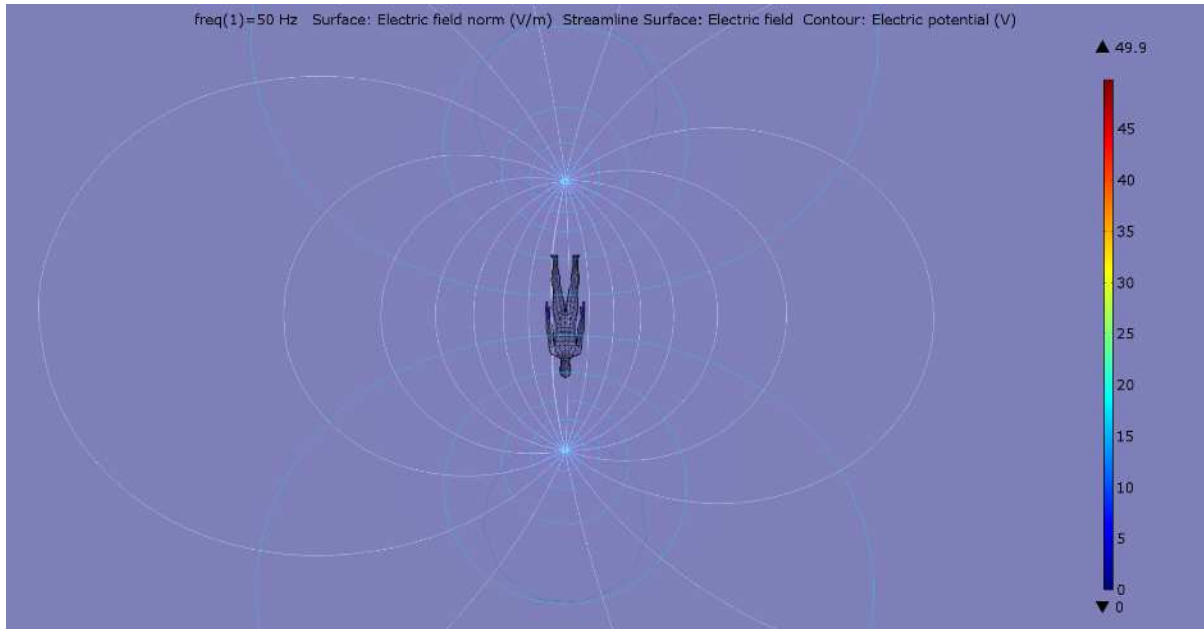
Figuur E-C-24 toont de zwemmer tussen 2 verticale geactiveerde grenzen om een elektrisch veld van 1 V/m te vormen op basis van het volgende:

- De bovenkant van de rug van de zwemmer bevindt zich 200 mm onder het wateroppervlak;
- Twee 5 m lange staven werden gebruikt als spanningsbron en -put om het niet-uniforme elektrisch veld te creëren; de straal van de staaf = 0,01 m; de staven bevonden zich 1 m aan weerszijden van het menselijke (volwassen) model.
- Menselijk geleidingsvermogen = 0,21 S/m
- Geleidbaarheid zoet water = 0,1 S/m

Figuur E-C-25 toont het niet-uniforme elektrisch veld in het water.



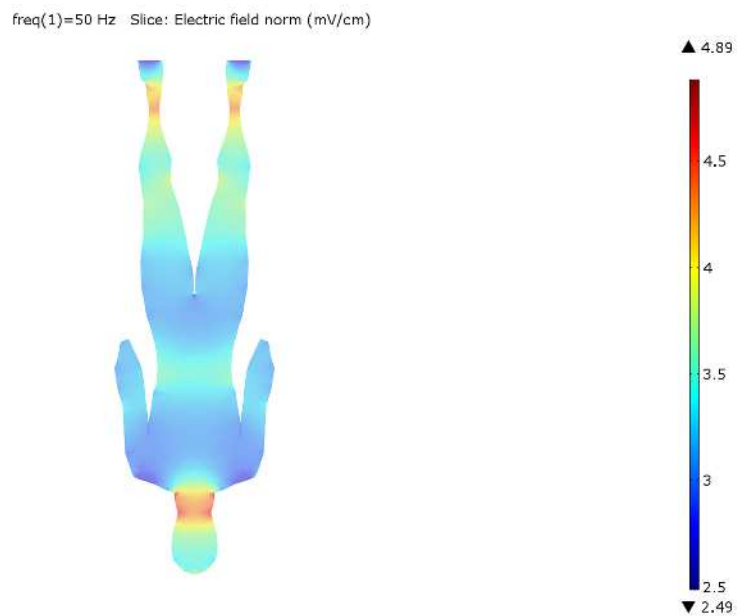
Figuur E-C-24 Zwemmer tussen 2 verticale onder spanning staande grenzen om een elektrisch veld van 1 V/m aan te bieden op basis van het volgende:



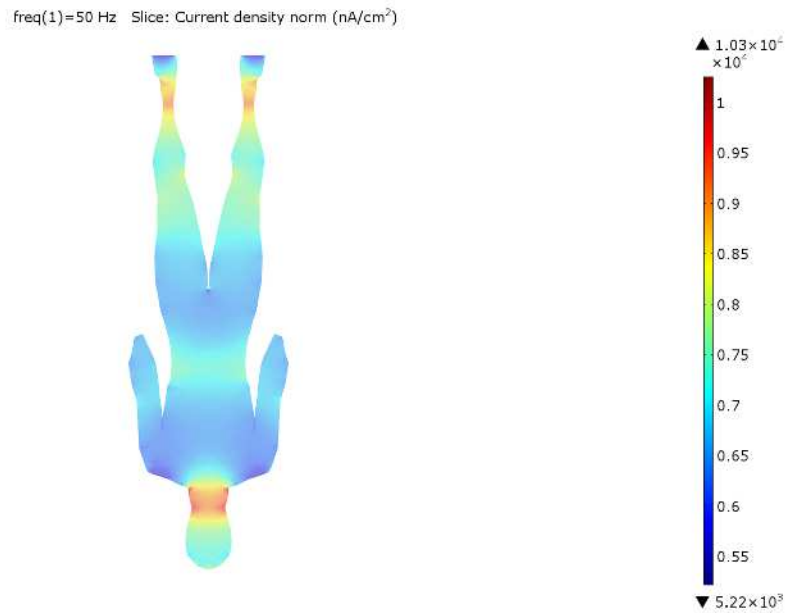
Figuur E-C-25 Niet-uniform elektrisch veld in het water.

E-C.7 Volwassen in niet-uniform elektrisch veld in zoet water

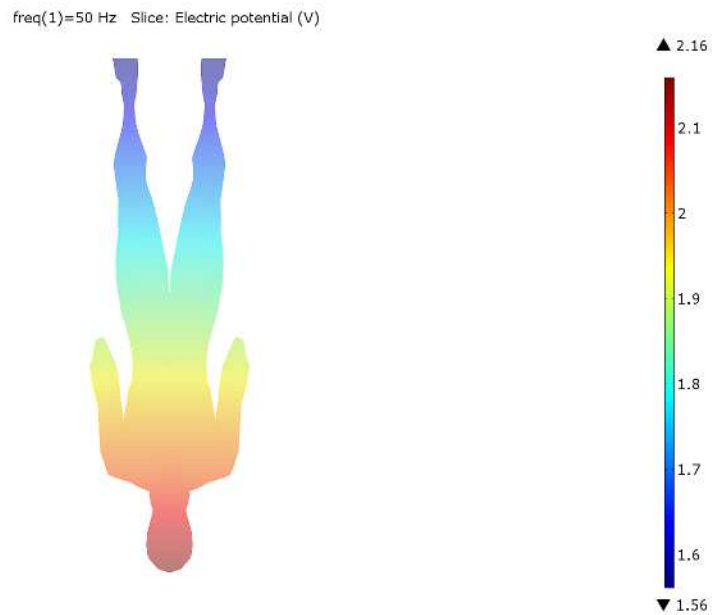
Figuur E-C-26 tot en met E-C-28 tonen het elektrisch veld in het lichaam, de stroomdichtheid in het lichaam en de elektrisch potentiaal over de mens in een elektrisch veld van 1 V/m in zoet water.



Figuur E-C-26 Elektrisch veld in het lichaam van de mens in een elektrisch veld in zoet water.



Figuur E-C-27 Stroomdichtheid in het lichaam van de mens in een elektrisch veld in zoet water.

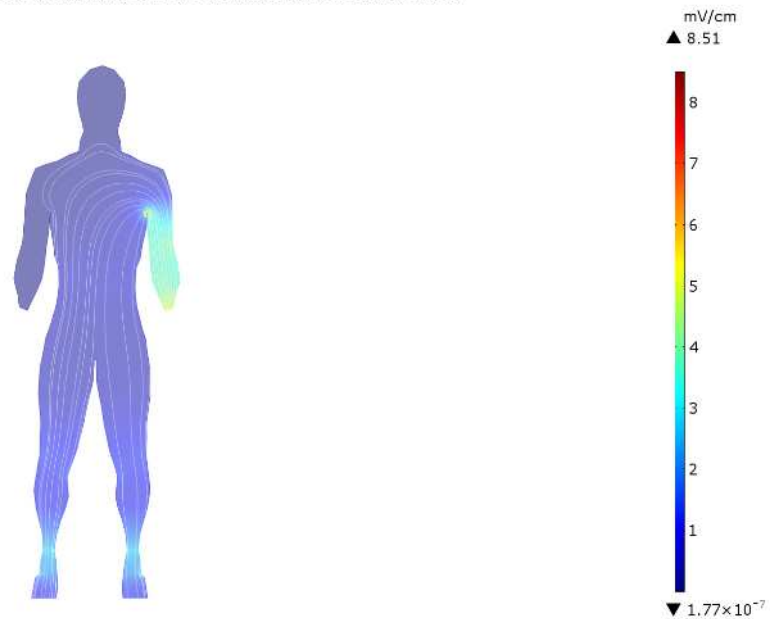


Figuur E-C-28 Elektrische potentiaal over de mens in een elektrisch veld in zoet water.

E-C.8 Vergelijking van stroom met lichaamscontactmechanismen

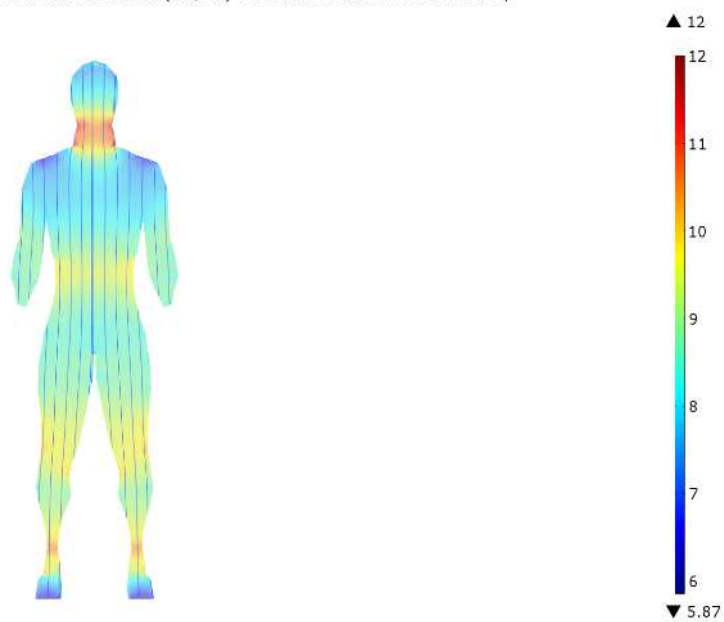
Figuren E-C-29 tot E-C-31 tonen het verschil in elektrisch veld en stroom in het lichaam als gevolg van verschillende contactmechanismen met het lichaam.

Surface: Electric field norm (mV/cm) Streamline Surface: Current density



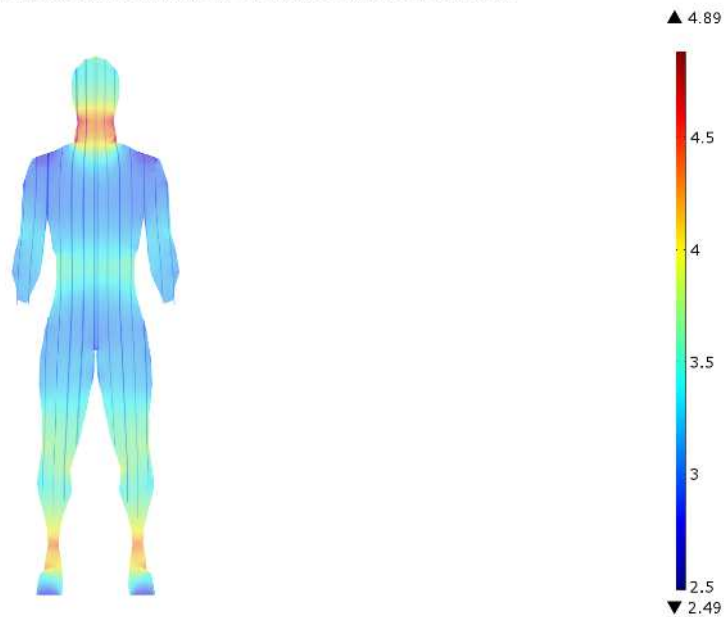
Figuur E-C-29 Elektrisch veld en stroom in het lichaam als gevolg van contactstroom van hand tot voet.

freq(1)=50 Hz Slice: Electric field norm (mV/cm) Streamline Surface: Current density



Figuur E-C-30 Elektrisch veld en stroom in het lichaam als gevolg van onderdompeling in water en blootstelling aan een uniform elektrisch veld in het water.

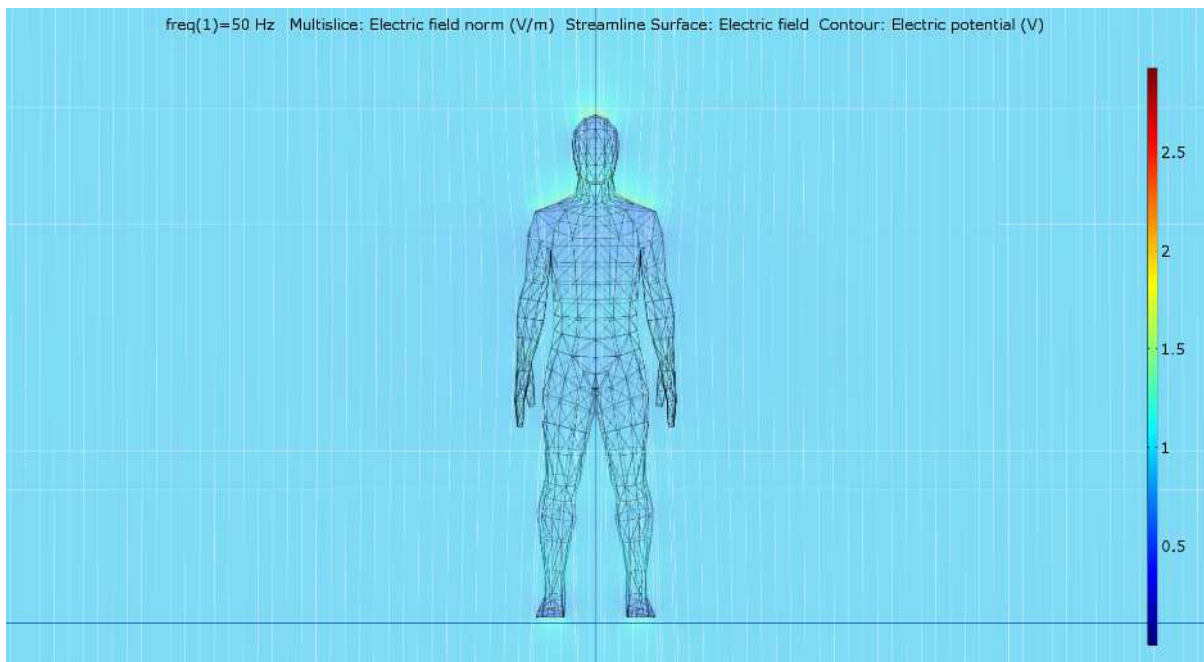
freq(1)=50 Hz Slice: Electric field norm (mV/cm) Streamline Surface: Current density



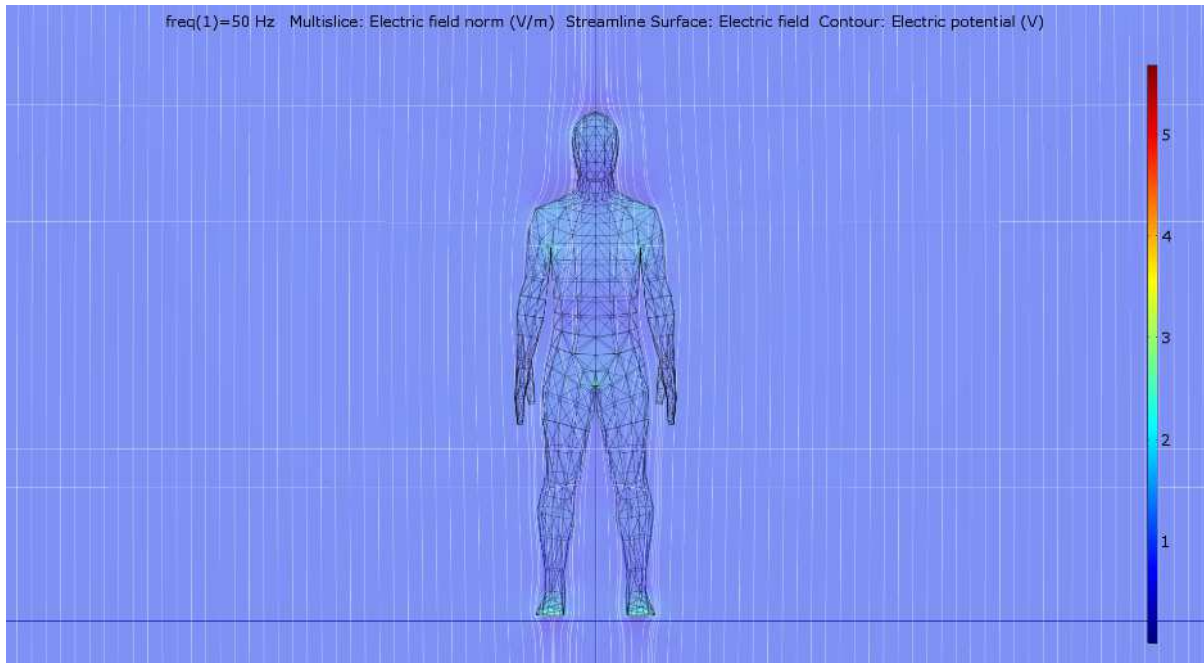
Figuur E-C-31 Elektrisch veld en stroom in het lichaam als gevolg van onderdompeling in water en blootstelling aan een niet-uniform elektrisch veld in het water.

Aanhangsel D bij Appendix E: VERSCHIL TUSSEN ZOET- EN ZEEWATER

Figuren E-D-1 en E-D-2 tonen het effect van het geleidingsvermogen van het water op de elektrische veldlijnen in het water voor zoet water en zeewater.



Figuur E-D-1 Effect van het geleidingsvermogen van het water op de elektrische veldlijnen in het water voor zoet water waarbij: Menselijk geleidingsvermogen = 0,21 S/m en zoet watergeleidingsvermogen = 0,1 S/m.



Figuur E-D-2 Effect van het geleidingsvermogen van het water op de elektrische veldlijnen in het water voor zoet water en zeewater waarbij: Menselijk geleidingsvermogen = 0,21 S/m en Zeewatergeleidingsvermogen = 5,5 S/m.

Aanhangsel E bij Appendix E: AANTEKENINGEN BIJ SPECIFIEKE VRAGEN

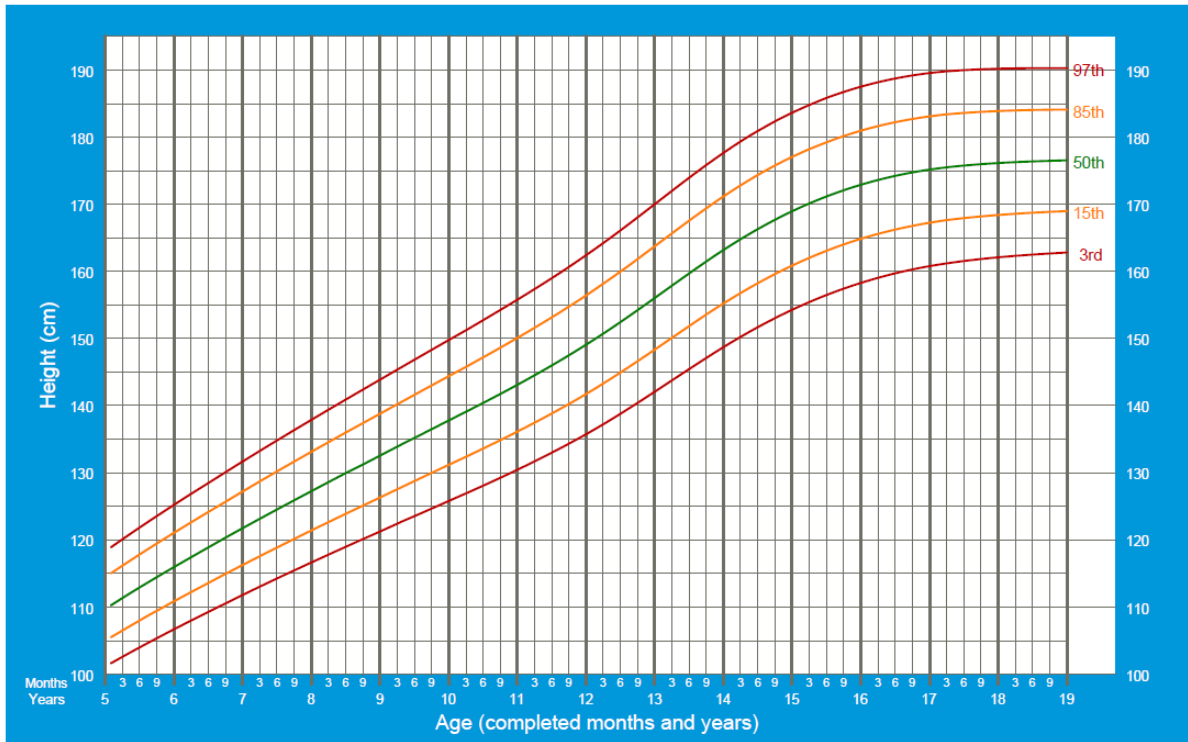
Vraag 1: Welke leeftijd stelt het mens/kind-model van 1,22 m voor?

Bij het beantwoorden van de vraag: Welke leeftijd stelt het mens/kind model van 1,22 m voor?

Figuur E-E-1 toont de lengte-voor-leeftijd voor jongens op basis van gegevens van de Wereldgezondheidsorganisatie.

Height-for-age BOYS

5 to 19 years (percentiles)




2007 WHO Reference

Figuur E-E-1 Lengte voor jongens op basis van gegevens van de Wereldgezondheidsorganisatie uit 2007.

Uit de gegevens kan worden opgemaakt dat het 1,22 m lange kindermodel representatief is voor een jongen van 6 jaar (85th percentiel) tot 7 jaar (50th percentiel).

Op basis van Tabel E-E-1 hieronder heeft een jongen van 6 jaar een body mass index (BMI) van 16,8 (85th percentiel) en een jongen van 7 jaar een BMI van 15,5 (50th percentiel).

Tabel E-E-1 BMI voor jongens (gegevens van de Wereldgezondheidsorganisatie).

BMI-for-age BOYS 5 to 19 years (percentiles)		 World Health Organization				
Year: Month	Months	3rd	15th	Median	85th	97th
5: 1	61	13.1	14.0	15.3	16.7	18.1
5: 2	62	13.1	14.0	15.3	16.7	18.1
5: 3	63	13.1	14.0	15.3	16.7	18.1
5: 4	64	13.1	14.0	15.3	16.7	18.1
5: 5	65	13.1	14.0	15.3	16.7	18.1
5: 6	66	13.1	14.0	15.3	16.7	18.1
5: 7	67	13.1	14.0	15.3	16.7	18.2
5: 8	68	13.1	14.0	15.3	16.8	18.2
5: 9	69	13.1	14.0	15.3	16.8	18.2
5: 10	70	13.1	14.0	15.3	16.8	18.2
5: 11	71	13.2	14.0	15.3	16.8	18.3
6: 0	72	13.2	14.0	15.3	16.8	18.3
6: 1	73	13.2	14.0	15.3	16.8	18.3
6: 2	74	13.2	14.1	15.3	16.9	18.4
6: 3	75	13.2	14.1	15.3	16.9	18.4
6: 4	76	13.2	14.1	15.4	16.9	18.4
6: 5	77	13.2	14.1	15.4	16.9	18.5
6: 6	78	13.2	14.1	15.4	16.9	18.5
6: 7	79	13.2	14.1	15.4	17.0	18.5
6: 8	80	13.2	14.1	15.4	17.0	18.6
6: 9	81	13.2	14.1	15.4	17.0	18.6
6: 10	82	13.2	14.1	15.4	17.1	18.7
6: 11	83	13.3	14.2	15.5	17.1	18.7
7: 0	84	13.3	14.2	15.5	17.1	18.8
7: 1	85	13.3	14.2	15.5	17.1	18.8
7: 2	86	13.3	14.2	15.5	17.2	18.8
7: 3	87	13.3	14.2	15.5	17.2	18.9
7: 4	88	13.3	14.2	15.6	17.2	18.9
7: 5	89	13.3	14.2	15.6	17.3	19.0
7: 6	90	13.3	14.3	15.6	17.3	19.0

Vraag 2: Welke rol speelt de grootte van de persoon?

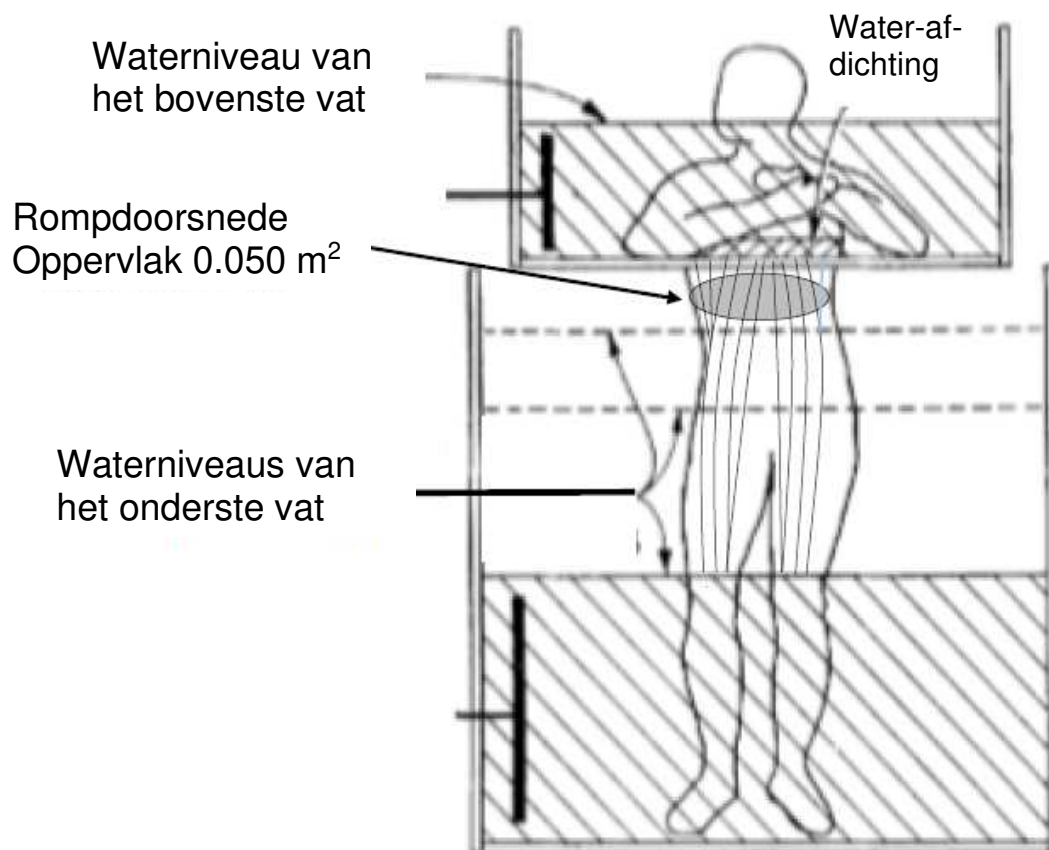
Bij de beantwoording van de vraag wordt gekeken naar de Body Mass Index (BMI). Het volgende is een fragment uit Carghill (2017) /8/:

"Metingen van de weerstand van de menselijke romp werden verricht door Smoot en Bentel (1964) /16/ door het onderlichaam en het bovenlichaam van een persoon, maar niet de rompstreek, onder te dompelen in afzonderlijke omhulsels met zout water, zoals getoond in Figuur I-2, en 5 mA stroom door de rompstreek te sturen, hetgeen elektrische velden in het lichaam vereiste, variërend van 0,21 tot 0,28 V/ft of 0,69 tot 0,92 V/m (1 V/ft = 3,28084 V/m).

"Op basis van de lengte en het gewicht van de mannelijke proefpersonen die voor deze metingen werden gebruikt, varieerden hun waarden voor de body mass index (BMI= gewicht (kg) / lengte² (m²)) van 19,8 tot 28,4. De gemeten waarden van de elektrische velden namen ruwweg lineair af met toenemende BMI".

Opmerking: Dit laatste suggereert in het algemeen dat personen met gewicht veiliger zijn. Dit geldt wanneer de stroom constant wordt gehouden. Het tegenovergestelde is waar als de persoon in een constant elektrisch veld in water wordt ondergedompeld.

"Uit een plot van elektrisch veld versus BMI werd een elektrische veldwaarde van 0,25 V/ft (0,82 V/m) verkregen voor BMI=25,3, dezelfde BMI-waarde die werd gebruikt om de oppervlaktes van de dwarsdoorsnede in Fig. 2 en Tabel 2 te schatten. De doorsnede van de romp voor BMI=22,3 werd geschat op 0,050 m² (Body Labs). Uitgaande van dit gebied komt de stroom van 5 mA overeen met een stroomdichtheid van 0,1 A/m², wat bij een elektrisch veld van 0,82 V/m een effectief geleidingsvermogen van 0,12 S/m oplevert, of een weerstand van 8,3 ohm-m, voor het menselijk lichaam" /8/.

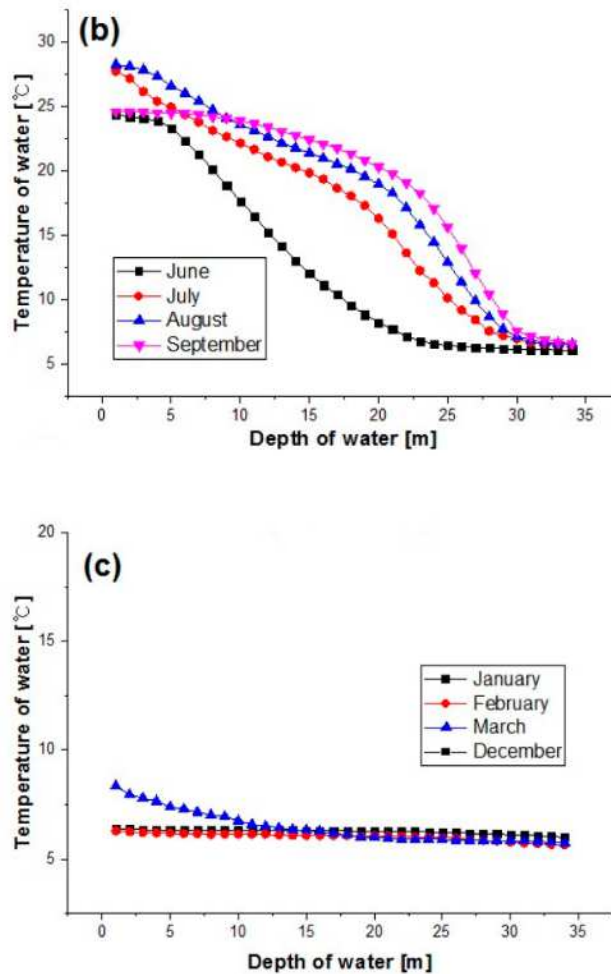


Figuur E-E-2 Schets van de opstelling die wordt gebruikt om de weerstand van de menselijke romp te bepalen (aangepast van Smoot en Bentel, 1964 /16/), met de stroombanen door de romp van het lichaam tussen de onderste tank en de bovenste tank /8/.

Vraag 3: Welke rol speelt de watertemperatuur?

Watertemperatuur - Waterbronnen elders:

Uit het werk van Ko, *et al*, (2017) /17/ is gebleken dat er in de zomer een aanzienlijk verschil van meer dan 20° C is tussen de temperaturen aan het oppervlak en 30 m onder het oppervlak van het waterlichaam, zoals weergegeven in Figuur E-E-3b. Daarom wordt een verschil in weerstand tussen de lagen verwacht. Aan de andere kant toonden Ko, *et al*, (2017) /17/ aan, dat er weinig verschil is in de watertemperatuur bij veranderende waterdiepte in de winter.

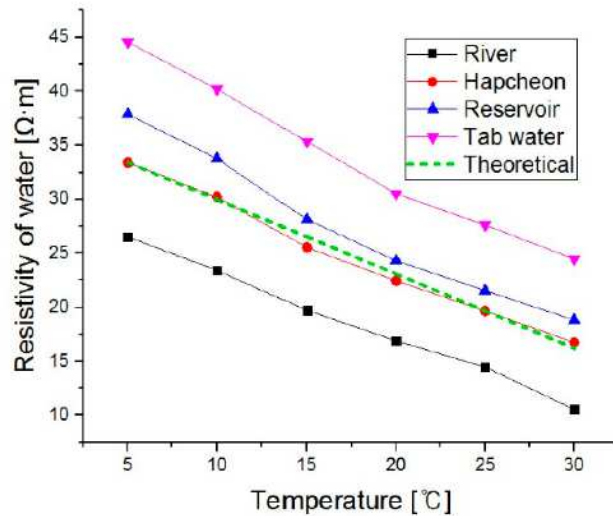


Figuur E-E-3 Seizoensgebonden watertemperatuur tegen waterdiepte bij de Hapcheon Dam (zuidelijk deel van het Koreaanse schiereiland) (b) in de zomer; (c) in de winter, volgens Ko, *et al*, (2017) /17/.

Het bovenstaande suggereert:

- Dat verdere werkzaamheden in verband met de veiligheidsanalyse het volgende moeten bevestigen: Verwacht wordt dat in de zomer een lagere waterweerstand kan bestaan wegens de hogere watertemperatuur en dat er dus meer stroom in het water kan vloeien met als gevolg een hoger elektrisch veld; dus een minimale elektrodeweerstand.
- De bijkomende vraag is: Of dit probleem kan worden overwonnen / beheerd met elektroden met een groter oppervlak en voldoende lange staafelektroden?

Ko, *et al*, (2017) /17/, toonde de verandering in weerstand versus temperatuur voor verschillende waterbronnen, zoals gepresenteerd in Figuur **E-E-4**.



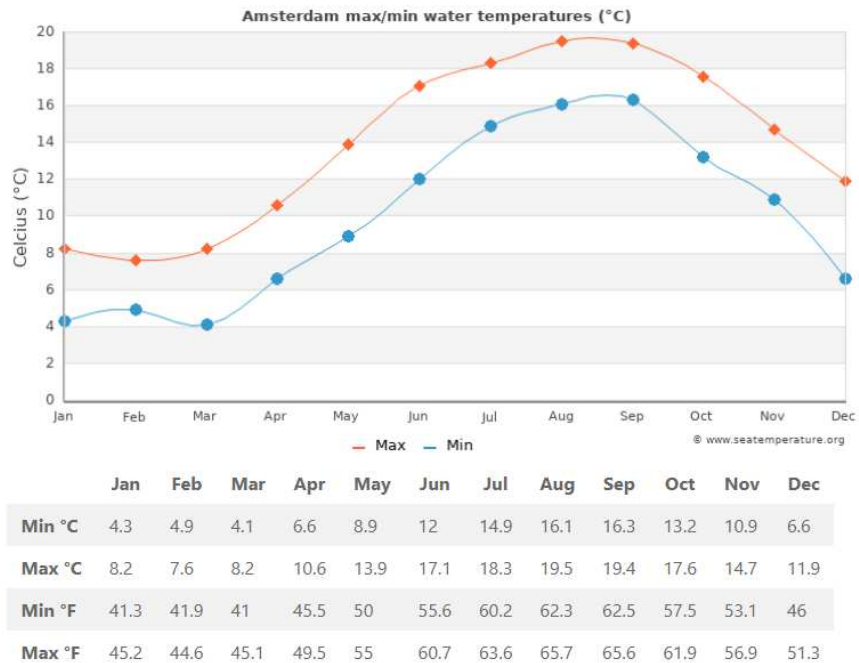
Figuur E-E-4 Weerstand van water uit verschillende bronnen tegen de temperatuur /17/.

De experimentele resultaten in Figuur E-E-4 laten zien dat de weerstand van het water varieert van 15-35 Ωm met een referentietemperatuur van 25 °C, en neigt toe te nemen met dalende temperatuur /17/.

Bij een temperatuur van 5° C bedroeg de maximale waterweerstand iets minder dan 35 Ωm (0,03 S/m). Het gebruik van een watergeleidingsvermogen van 0,1 S/m (10 Ωm) was dus conservatief, niet alleen met het oog op de Hapcheon-dam (zoet water), maar ook met het oog op de resultaten in Figuur E-E-4 hierboven.

Watertemperatuur - Waterbron in Nederland:

Uit Figuur E-E-5 en onderstaande Tabel /18/ blijkt het volgende:



Figuur E-E-5 Watertemperatuur in Amsterdam /18/.

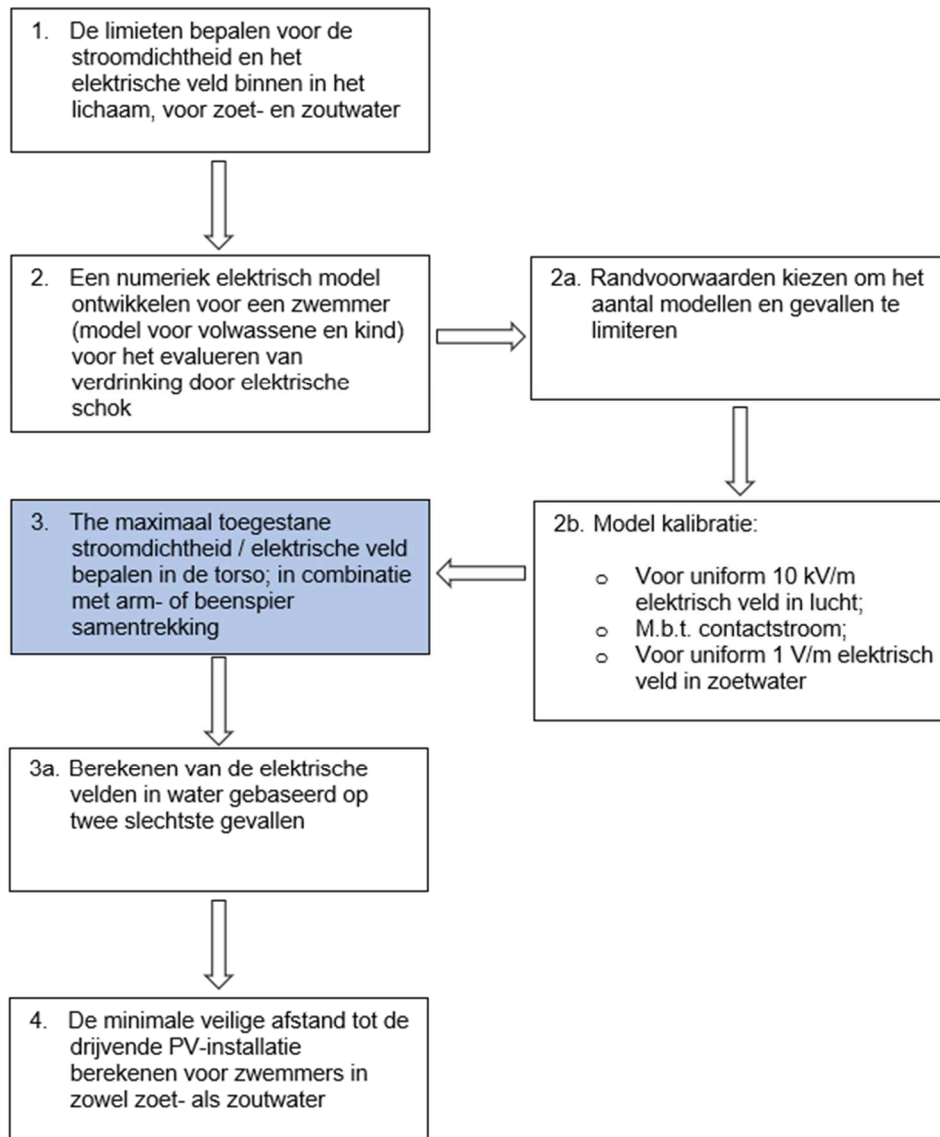


In het algemeen kan worden gesteld dat de minimumwatertemperatuur van 5 °C in Figuur **E-E-4** overeenstemt met de minimumwatertemperatuur van 4,3 °C in Amsterdam /18/.

APPENDIX F

Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 3: Criteria veiligheidsbeoordeling

Onder verwijzing naar Figuur 28 worden in dit deel van de studie de beoordelingscriteria voor de veiligheid van zwemmers opnieuw bekeken.



Figuur 28 In dit deel van de studie worden de beoordelingscriteria voor de veiligheid van zwemmers opnieuw bekeken.

F-1 Beoordelingscriteria

In Appendix D is een elektrisch veldniveau in zoet water van 2,54 V/m gekozen als veiligheids criterium voor gebruik bij de beoordeling.

De waarde van 2,54 V/m die wordt voorgesteld als veiligheidsdrempel in zoet water is 47 % van de door Carghill /8/ voorgestelde drempelwaarde voor ademhalingsstilstand (5,4 V/m), zoals blijkt uit Tabel 12.

Tabel 12 Elektrisch veld in het water en stroomdichtheid in het lichaam, gebruikt als veiligheids criterium bij de beoordeling van de veiligheid van zwemmers (van boven naar beneden gericht) in zoet water (uit Appendix D).

Nr.	Antwoord / Beschrijving	Lichaamsstroom Dichtheid (nA/cm ²)	Zoet water (0,1 S/m)	
			Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Elektrisch veld (V/m)
1	Ademhalingsstilstand - Zoals in Tabel 3 met 47% veiligheids- marge	3,01 x 10 ⁴	2,54 x 10 ⁴	2,54
2	Ademhalingsbescherming - 47% veiligheidsniveau - gerela- teerd aan 1 V/m	1,19 x 10 ⁴	1,00 x 10 ⁴	1,0

In Appendix E wordt in Tabel 13 de stroomdichtheid voor verschillende delen van het lichaam weergegeven wanneer het lichaam in water en een elektrisch veld van 1 V/m is ondergedompeld.

Tabel 13 Samenvatting van de berekende stroomdichtheid in het lichaam, gebaseerd op het menselijke model ondergedompeld in water met een elektrisch veld van 1 V/m.

VOLWASSEN

Nr.	Lichaamsniveau	Huidige Dicht- heid (nA/cm ²)	Opmerkingen
1	Hoofd	1,77 x 10 ⁴	Maximum = 17,7 μA/cm ²
2	Hals	2,14 x 10 ⁴	Maximum = 24,4 μA/cm ²
3	Torso (positie van het hart)	1,71 x 10 ⁴	Maximum = 17,1 μA/cm ²
4	Bekken	1,89 x 10 ⁴	Maximum = 19,8 μA/cm ²
5	Enkel	2,09 x 10 ⁴	Maximum = 22,3 μA/cm ²
	Gemiddeld	1,92 x 10⁴	

Uit regel 2 van Tabel 12 en regel 6 in Tabel 13 blijkt dat de twee waarden voor de stroomdichtheid van de nota's 1,19 / 1,92 = 62 % verschillen. De reden hiervoor is dat het door Carghill (2017) /8/ beschouwde geleidingsvermogen van het lichaam 0,12 S/m bedroeg (zie Tabel 7), terwijl dat van punt 14 0,21 S/m bedroeg (zie Tabel 7, Appendix E). Dit laatste levert een verschil van 0,12 / 0,21 = 57 % op. Voor hetzelfde elektrisch veld in water levert een hoger lichaamsgeleidings- vermogen een hogere stroomdichtheid op uit $J = \sigma E$.

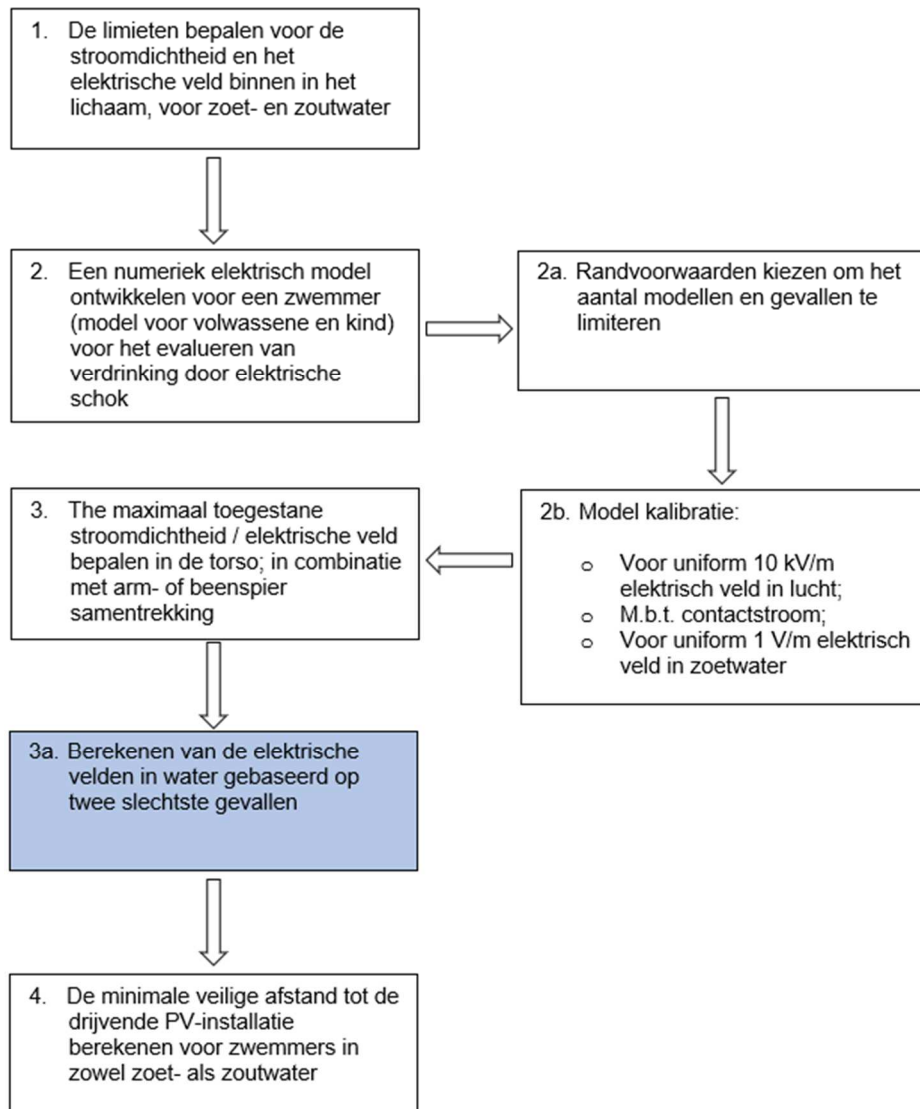
De laatste:

- Is de reden waarom de gemiddelde stroomdichtheid in Tabel 13 hoger is dan die in regel 2 van Tabel 12.
- Presenteert het verband tussen het werk van Carghill (2017) /8/ en de in dit verslag gepresenteerde veiligheidsbeoor- deling.

F-2 Beschouwde Foutscenario's

F-2.1 Inleiding

Onder verwijzing naar Figuur 29 wordt in dit deel van de studie ingegaan op de foutscenario's die in acht zijn genomen om de veiligheid van de zwemmers te beoordelen.



Figuur 29 In dit deel van de studie wordt ingegaan op de foutsenario's die in acht worden genomen om de veiligheid van de zwemmer te beoordelen.

F-2.2 Overwogen foutsenario's

De volgende foutsenario's werden in aanmerking genomen:

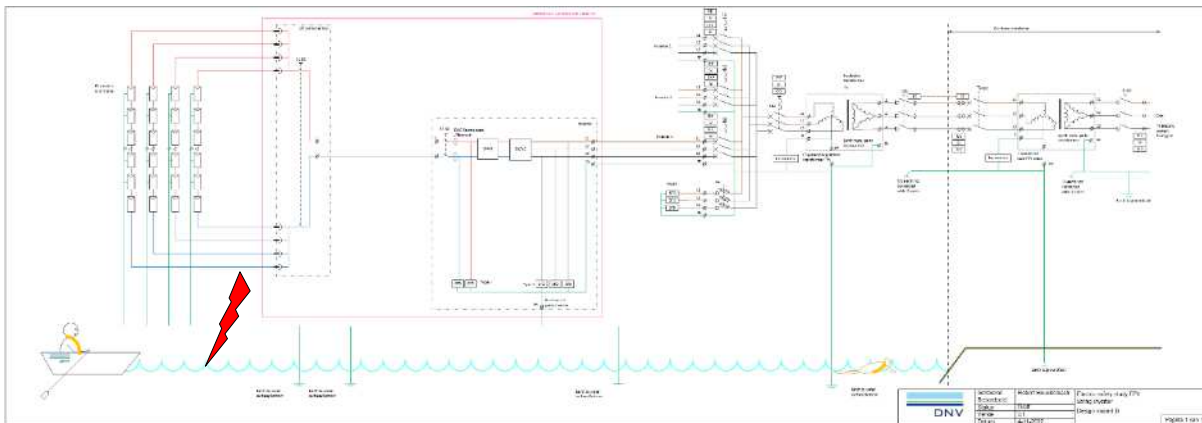
- Foutsenario B nr. 4 (twee gevallen werden in aanmerking genomen zoals hieronder beschreven);
- Foutsenario D nr. 2;

F-2.3 Foutsenario B-4 (a) en (b)

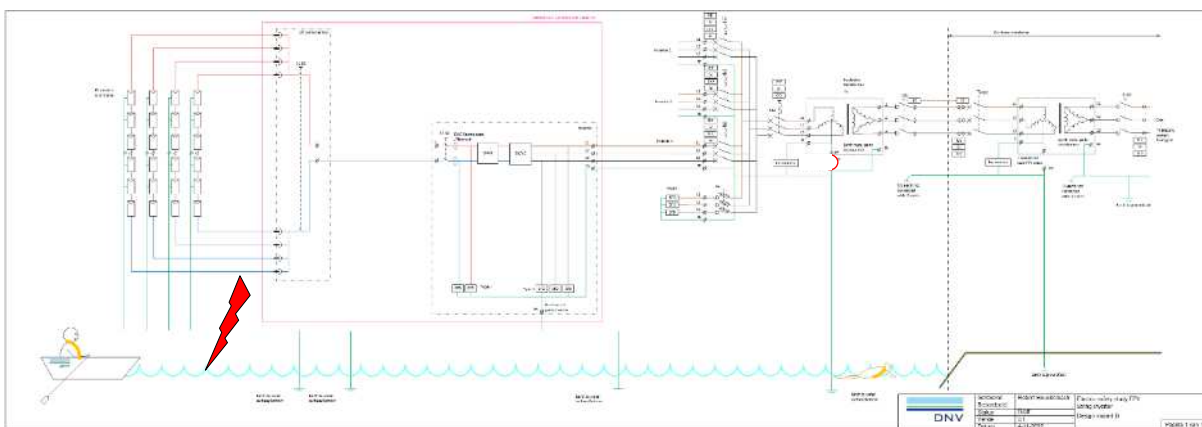
Tabel 14 geeft een overzicht van de bijzonderheden met betrekking tot foutsenario B-4 (a) en (b), met details in de figuren 30 en 31.

Tabel 14 Samenvatting van de bijzonderheden met betrekking tot fouts scenario B-4 (a) en (b).

Nr.	Scenario Beschrijving	Beschrijving van de huidige route	Numeriek model	Foutstroom	“Fault Clearing Time”
B-4	Aardlek van de DC-kabel naar de omvormer.	PV-modules, stringkabel, foutlocatie naar aarde/water, <u>OPEN VERBINDING</u> naar sterpunt MV/LV transformator, via 3 fasen naar omvormer, stringkabel terug naar de PV-modules.	a) <u>OPEN Aansluiting op MV/LV-sterpunt</u> : foutstroom in het water injecteren; geen foutstroomafvoer. b) <u>GESLOTEN Aansluiting op MV/LV-sterpunt</u> : Injecteer foutstroom in water; zuig foutstroom af op sterpunt.	300 A DC	Geen oplossing



Figuur 30 Fouts scenario B-4(a): Aardlek van de DC-kabel naar de omvormer - DC-kabel in het water - OPEN verbinding met MV/LV-sterpunt: foutstroom in het water injecteren; geen foutstroomafvoer.



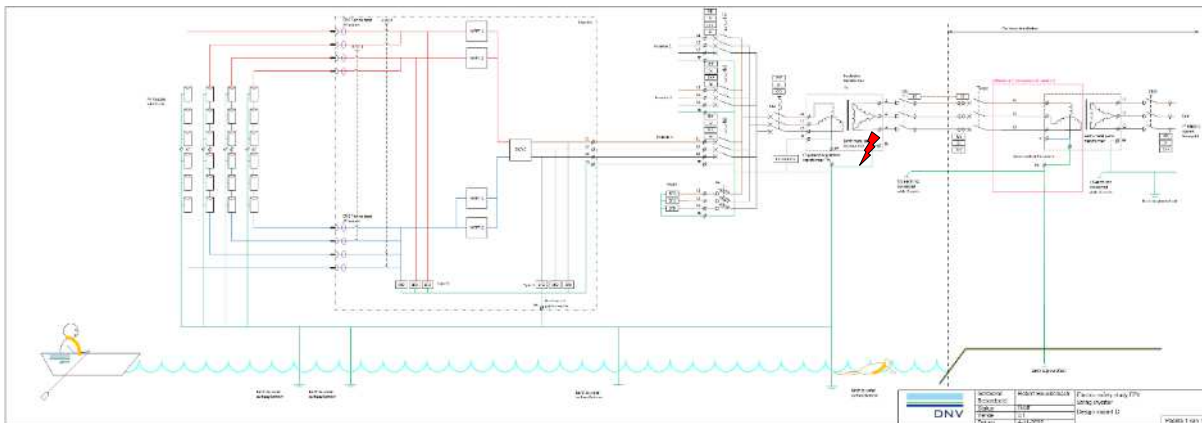
Figuur 31 Fouts scenario B-4(a): Aardlek van DC-kabel naar omvormer - DC-kabel in water - GESLOTEN Aansluiting op MV/LV-sterpunt: Foutstroom in water injecteren; foutstroom op sterpunt afvoeren.

F-2.4 Foutsценario D-2

Tabel 15 geeft een overzicht van de bijzonderheden met betrekking tot foutsценario D-2, met details in Figuur 32.

Tabel 15 Samenvatting van de bijzonderheden met betrekking tot foutsценario D-2.

Nr.	Scenario Beschrijving	Beschrijving van de huidige route	Numeriek model	Foutstroom	“Fault Clearing Time”
2	Fase-aardfout bij MV/LV-station	Transformatorwikkeling HV/MV, stroomonderbreker, zwevende kabel, foutlocatie, aardcircuit/water, direct naar sterpunt HV/MV transformator.	Injecteer foutstroom in het FPV-aardingsstelsel; neem foutstroom af bij het HV/MV-sterpunt.	7968 A (berekend met een aardcircuitimpedantie van 1 Ω).	0,3 s (Bij de veiligheidsanalyse wordt geen rekening gehouden met de Fault Clearing Time)



Figuur 31 Fase/aardfout in MV/LV-station - injecteer foutstroom in het FPV-aardingsstelsel; neem foutstroom af in HV/MV-sterpunt - geen foutvereffeningstijd in aanmerking voor veiligheidsanalyse.

F-2.5 In het model beschouwde kabelgegevens

Details over de elektrische kabels die in het model in acht zijn genomen, staan in Appendix J.

F-2.6 In het model in acht genomen bodemweerstand

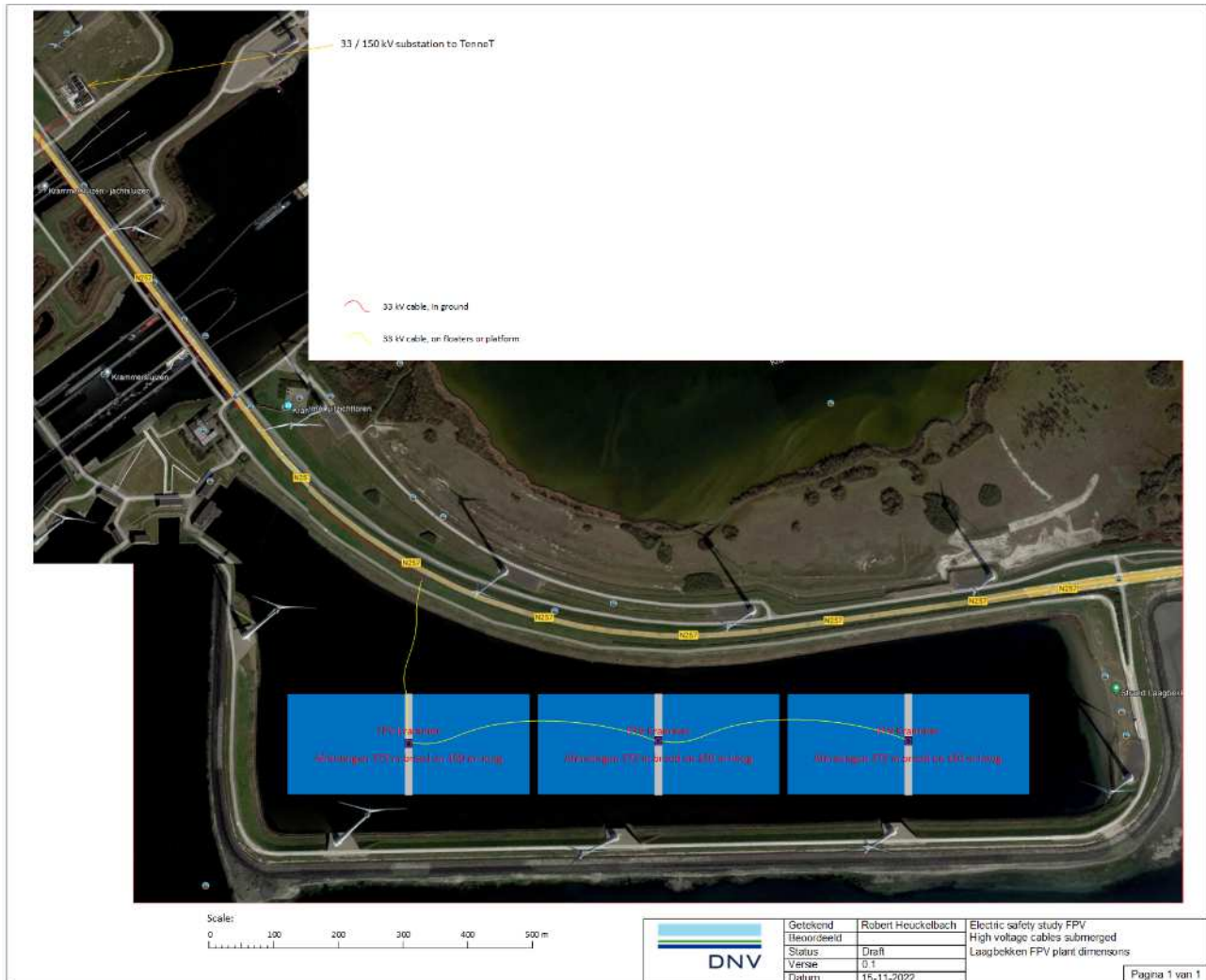
Details over de in het model in acht genomen bodemweerstand op de bodem van het waterlichaam staan in Appendix K.

Aanhangsel A bij Appendix F: KABELS - ONDERSTEUNENDE GEGEVENS

F-A.1 Kabels via de waterweg

Figuur F-A-1 toont de kabels via het watertracé dat in het model is beschouwd, met kabeldetails in Tabel F-A-1.

Zoals eerder opgemerkt, toont Figuur F-A-1 de laaggelegen hoogspanningskabels van FPV Kramer. De kabelverbinding is gebaseerd op een FPV-installatie van 24 MWac verdeeld over 3 eilanden. Het uitgangspunt voor de middenspanning is 33 kV. De kabel gaat door het water van eiland naar eiland.



Figuur F-A-1 Kabels via de in het model beschouwde waterweg.

Tabel F-A-1 Samenvatting van de kabelgegevens / details.

Van	Naar	Belastingsstroom	Beschrijving van MV-kabels	Lengte
HV station	1 ^e Eiland (links)	420 A	2 x 3 x YMeKrvasdLwd 18/30 kV 1 x 70 rs+as 25	1600 m

1 ^e Eiland (links)	2 ^e Eiland (links)	280 A	3 x YMeKrvasdlwd 18/30 kV 1 x 120 rs+as 25 of VG-YMvKrvasmb 18/30 kV 3 x 150 rs+as 50	425 m
2 ^e Eiland (links)	3 ^e Eiland (links)	140 A	3 x YMeKrvasdlwd 18/30 kV 1 x 70 rs+as 25	425 m

Opmerking: Het 25 mm² csa koperen aardscherm werd gemodelleerd als een 25 mm² koperen aardleiding.

Tabel F-A-2 bevat kabelgegevens voor de gemarkeerde kabels van 185 mm² of 120 mm², zoals verkregen uit de kabel-catalogus.

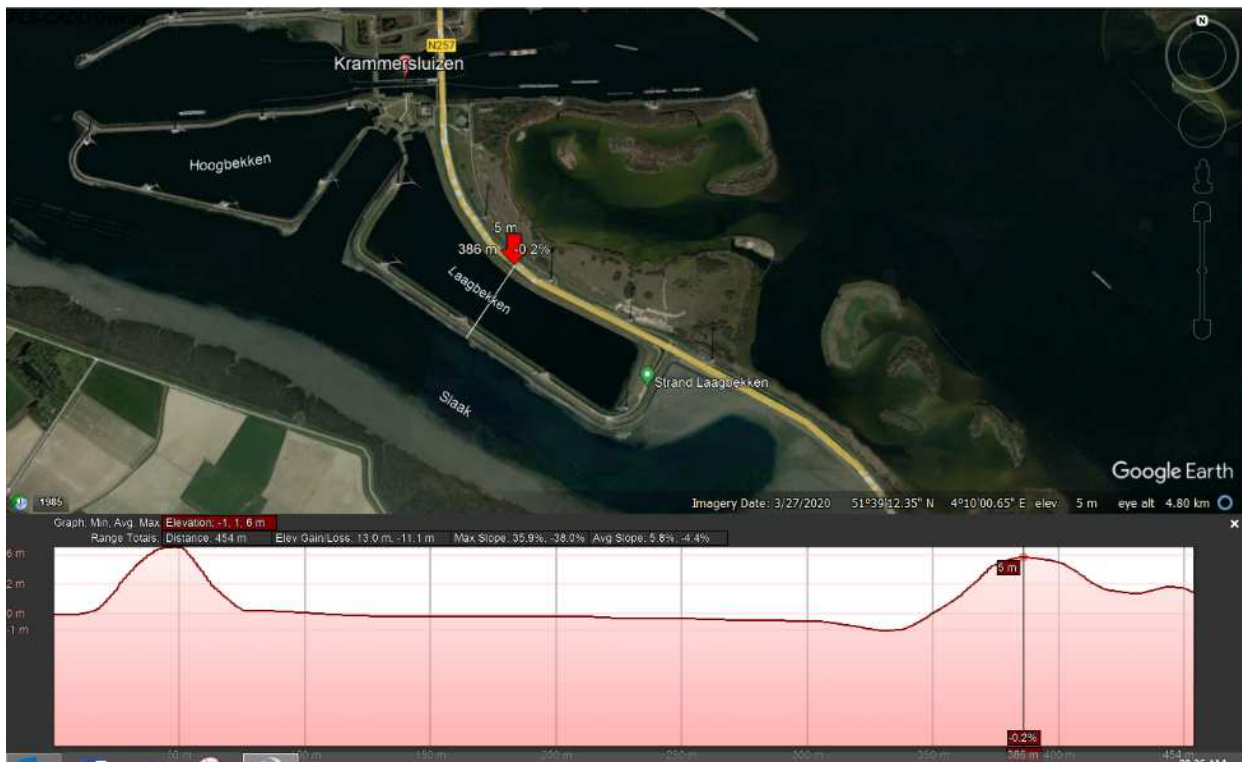
Tabel F-A-2 Kabelgegevens voor de gemarkeerde kabels van 185 mm² of 120 mm² zoals verkregen uit de kabel-catalogus [12 kV of 36 kV - 1 aderige kabel - 420 A - 300 Aluminium sq mm (twee platforms rechts 185 mm² of 120 mm²).

Twenpower single-core medium-voltage cables rated 18/30 kV with stranded copper conductor. *)									
nominal core c.s.a. mm ²	earthing screen c.s.a. mm ²	diameter over				weight kg/m	reactance (at 50 Hz)		capacitance (at 50 Hz) µF/km
		conductor mm	insulation mm	earthing screen mm	cable mm		trefoil Ω/km	flat Ω/km	
1 x 35	25	7.1	25.7	30.6	37	1.4	0.162	0.236	0.13
1 x 50	25	8.2	26.8	31.7	39	1.6	0.156	0.229	0.14
1 x 70	25	9.9	28.5	33.4	40	1.8	0.146	0.219	0.16
1 x 95	25	11.5	30.1	35.0	42	2.1	0.140	0.211	0.17
1 x 120	25	13.0	31.6	36.5	43	2.4	0.134	0.205	0.18
1 x 150	25	14.5	33.1	38.0	45	2.7	0.129	0.199	0.20
• 1 x 185	25	16.1	34.7	39.6	46	3.1	0.125	0.194	0.21
1 x 240	25	18.6	37.2	42.1	49	3.8	0.120	0.187	0.23
• 1 x 300	25	20.6	39.2	44.1	51	4.3	0.116	0.182	0.25
1 x 400	50	24.0	42.6	47.5	55	5.6	0.112	0.178	0.28
1 x 500	50	27.2	45.8	50.7	58	6.7	0.108	0.172	0.30
1 x 630	50	31.1	49.7	54.6	62	8.1	0.103	0.165	0.34

Aanhangsel B bij Appendix F: BODEMWEERSTAND - ONDERSTEUNENDE GE-GEVENS

F-B.1 Diepte van Krammersluizen FPV Waterlichaam

Volgens het horizontale profiel van Google Earth is de diepte van het Krammersluizen FPV-waterlichaam (Laagbekken) vrij ondiep met een diepte van ongeveer 5 m (Figuur F-B-1). De afmetingen van Laagbekken zijn bij benadering 1300 m x 312 m.



Figuur F-B-1 Volgens het horizontale profiel van Google Earth is de diepte van de Krammersluizen FPV-waterloop (Laagbekken) vrij ondiep, met een diepte van ongeveer 5 m.

F-B.2 Bodemweerstand van de bodem van Krammersluizen FPV Waterlichaam

Volgens DinoLoket /19/ waren er bodemweerstandgegevens beschikbaar van drie profielen die zich het dichtst bij Laagbekken bevinden, zoals weergegeven in Figuur F-B-2.

Van boven naar beneden (in Figuur F-B-2) waren de profiellabels:

- W43C0018
- W43C0019
- W43C0001

De details van de bodemweerstand bij elk van de profielen zijn hieronder weergegeven.

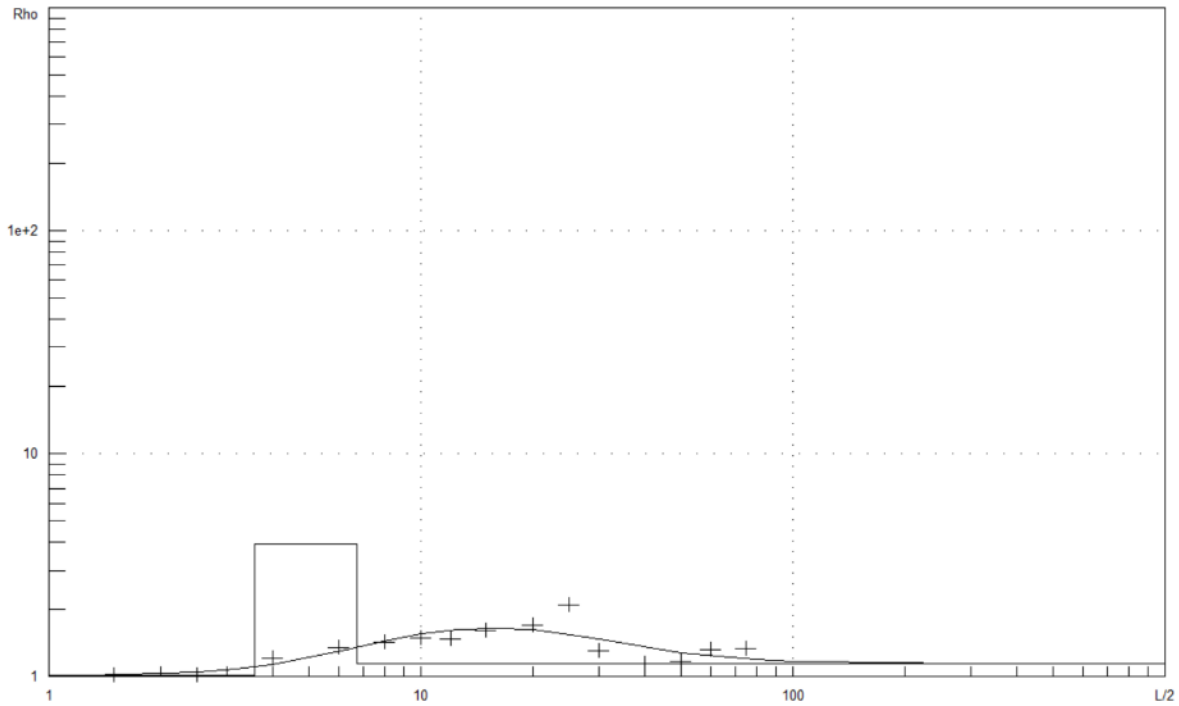


Figuur F-B-2 Er waren bodemweerstandgegevens beschikbaar van drie profielen in de buurt van Laagbekken volgens DinoLoket /19/.

F-B.3 Bodemweerstandgegevens - Profiel W43C0018

Identificatie:	W43C0018
Coördinaten:	69520, 407970 (RD)
Model aanwezig:	Ja
Einddiepte model:	150.00 m
Datum van uitvoering:	19-07-1960
Aantal metingen:	25
L/2:	400 m
Aantal modellen:	1

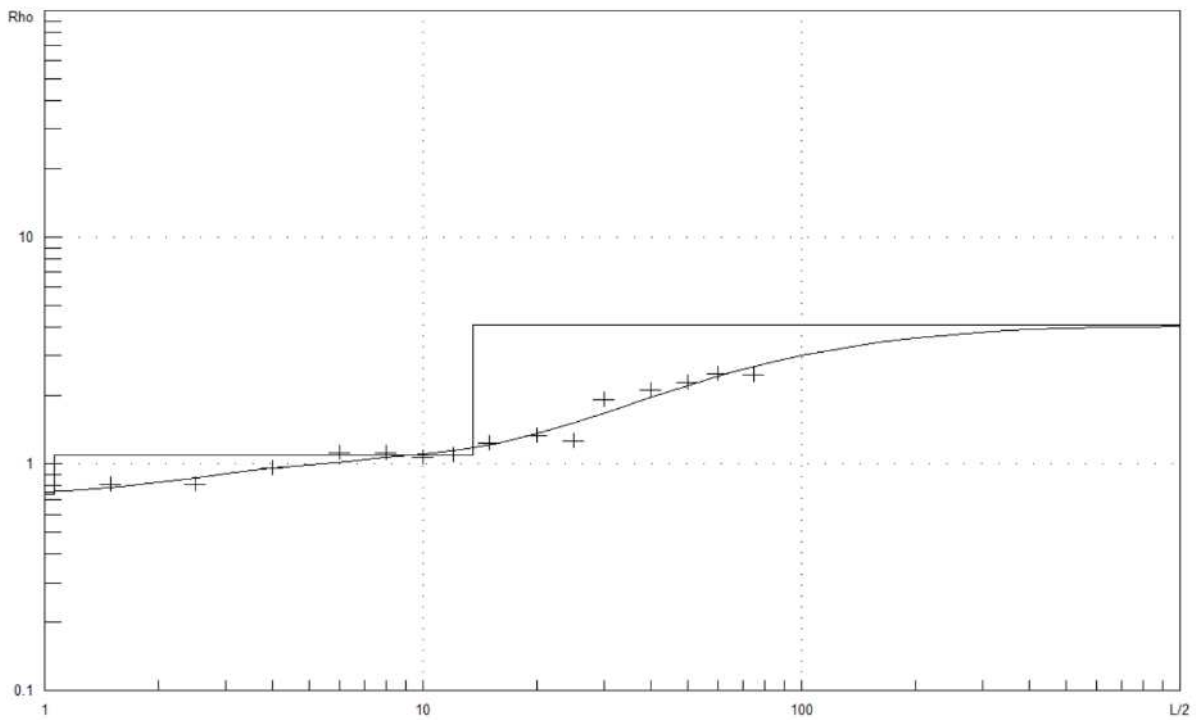
Optimization results				
Rho	%	Depth	%	
1,01	12%	3,57	83%	
3,93	100%	6,75	100%	
1,14	15%			
RMSE	log unit			
RMSE	4,7648E-02			



F-B.4 Bodemweerstandgegevens - Profiel W43C0019

Identificatie: W43C0019
 Coördinaten: 69500, 407540 (RD)
 Model aanwezig: Ja
 Einddiepte model: 140.00 m
 Datum van uitvoering: 19-07-1960
 Aantal metingen: 25
 L/2: 400 m
 Aantal modellen: 1

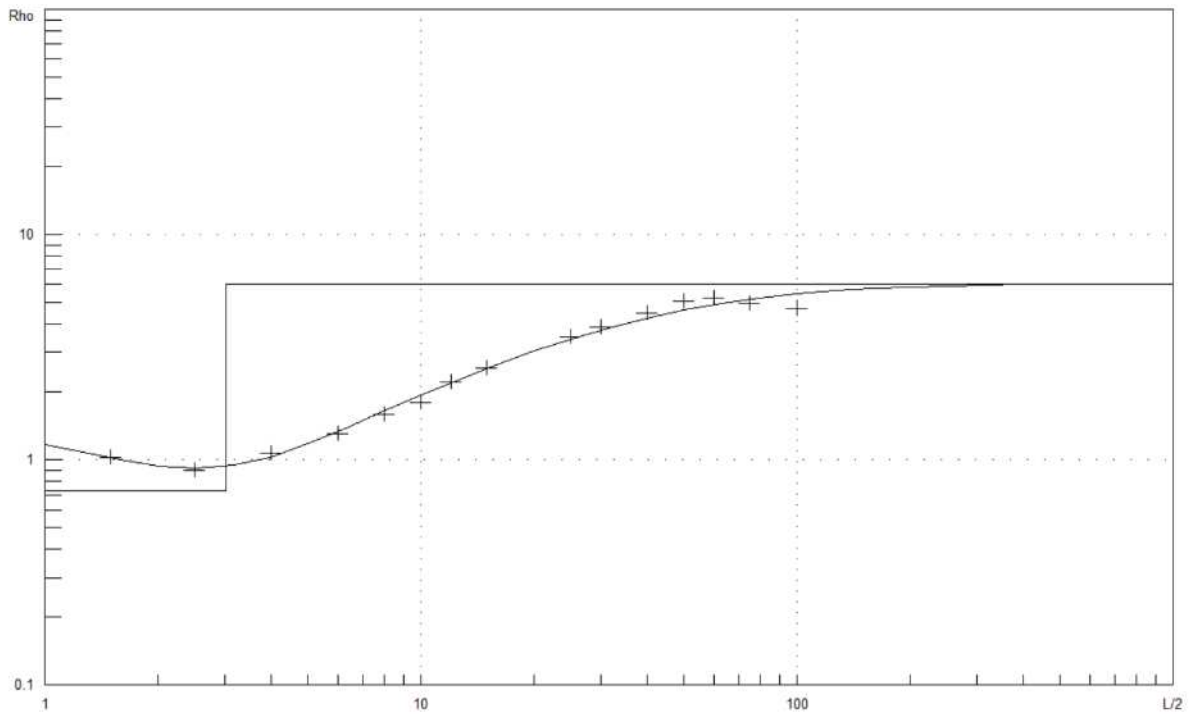
Optimization results			
Rho	%	Depth	%
0,73	24%	1,06	68%
1,09	11%	13,58	24%
4,08	25%		
RMSE	log unit		
RMSE	3,2989E-02		



F-B.5 Bodemweerstandgegevens - Profiel W43C001

Identificatie: W43C0001
 Coördinaten: 69280, 407270 (RD)
 Model aanwezig: Ja
 Einddiepte model: 150.00 m
 Datum van uitvoering: 07-07-1960
 Aantal metingen: 26
 L/2: 500 m
 Aantal modellen: 1

Optimization results			
Rho	%	Depth	%
1,42	81%	0,56	92%
0,73	43%	3,03	67%
6,06	6%		
RMSE	log unit		
RMSE	2,5046E-02		



F-B.6 Bodemweerstandgegevens - Opnamemethode

In e-mail correspondentie /20/ is bevestigd dat de bodemweerstandgegevens van de profielen W43C0018 en W43C0019 zijn verzameld bij laag water op het zand zonder dat er water op de bodemstructuur aanwezig was. Zie bevestiging ook in Figuur F-B-3.

IV.2. Uitvoering van het onderzoek in de Zeeuwse en Zuidhollandse wateren.

Het onderzoek in de Zeeuwse en Zuidhollandse wateren maakte bijzondere voorzieningen wat betreft het transport van personeel en apparatuur noodzakelijk. Voor de metingen, welke in 1960 werden verricht, stelde de Deltadienst het stoomschip Christiaan Brunings en een bijboot met buitenboordmotor ter beschikking.

In de omgeving van de meetplaatsen ging de "Brunings" in diep water voor anker, waarna met de bijboot de droogvallende plaat of schor werd bereikt. Bij gunstige weersomstandigheden konden tijdens één laag water twee metingen worden verricht. Evenwel was het weer over het algemeen slecht.

De voor de stroomvoorziening benodigde apparatuur bleef tijdens de meting in de bijboot; de meetapparatuur werd met een draagbaar, waarin tevens de kabeltrommels waren opgehangen, aan wal gedragen. De draagbaar fungeerde tevens als meettafel. De meet apparatuur stond met een extra kabel in verbinding met de bijboot. Behalve de gebruikelijke meetarbeiders was een extra werkkraft aanwezig voor het vlothouden van de bijboot.

Figuur F-B-3 Bevestiging van de methode voor het vastleggen van de bodemweerstandgegevens.

F-B.7 Bodemweerstand gebruikt in het model

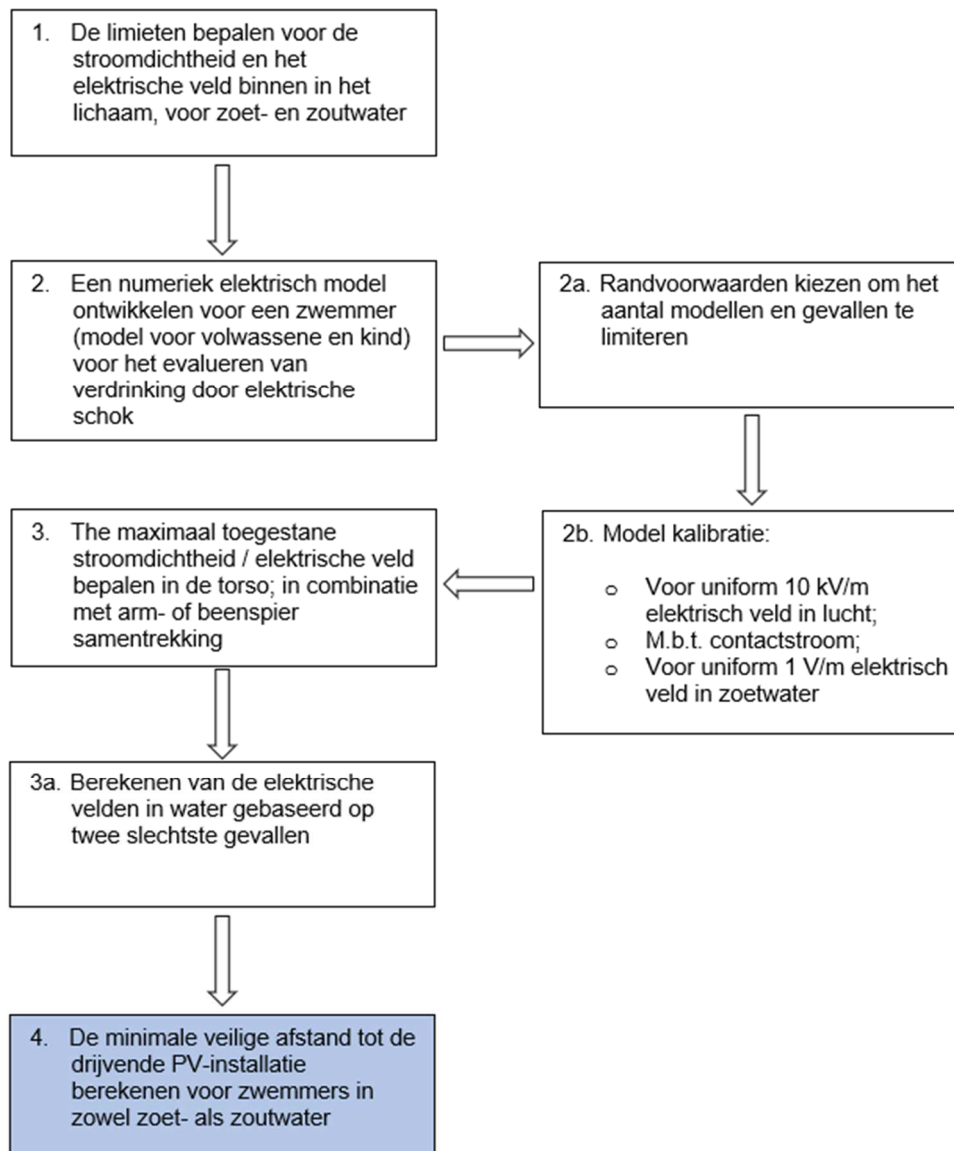
De gegevens over de bodemweerstand van de bovengenoemde bodemstructuren waren allemaal ruim onder de 10 Ωm . De waterweerstand die in het numerieke model werd gebruikt was 10 Ωm (0,1 S/m). De reden hiervoor is, zoals eerder opgemerkt, dat als de situatie veilig is voor zoet water, deze ook veilig zal zijn voor zeewater.

APPENDIX G

Analyse zwemwaterveiligheid - Deel 4: Minimale veilige afstand

G-1 Inleiding

Onder verwijzing naar Figuur G-1 wordt in dit deel van de studie ingegaan op de veiligheidszones bij de beoordeling van de veiligheid van zwemmers.

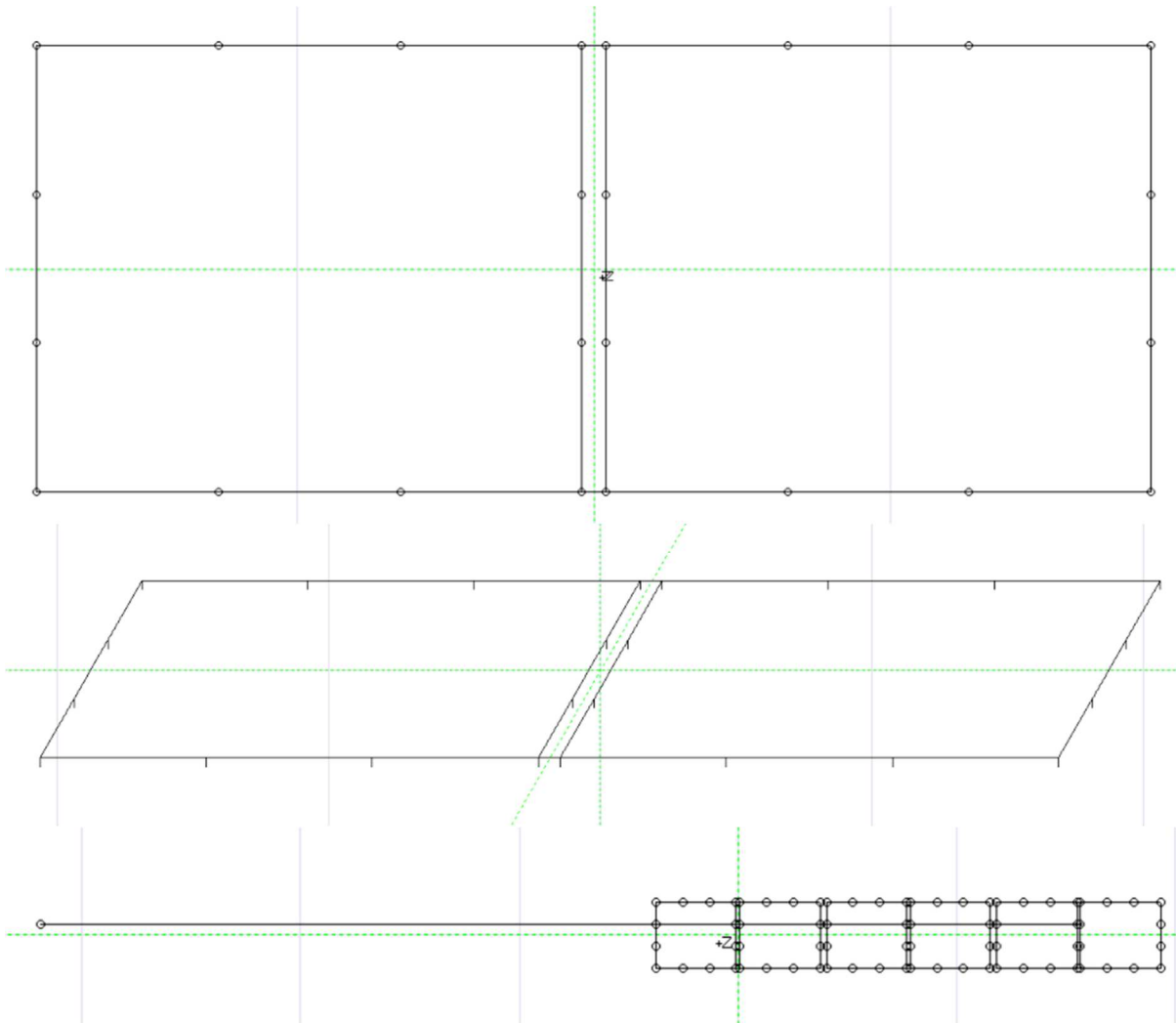


Figuur G-1 Dit deel van de studie behandelt de veiligheidszones bij de beoordeling van de veiligheid van zwemmers.

G-2 Numeriek model

Zoet water

Figuur G-2 geeft het model weer van het drijvende PV-installatie dat bij de beoordeling is gebruikt. Voor een enkel drijvend platform bestond de elektrode uit een elektrode van 375 m x 150 m met een tussenruimte van 8 m en 24 staafelektroden van 3 m. Alle geleidende elementen werden gemodelleerd als massieve koperen geleiders met een diameter van 10 mm. De getoonde ringelektroden bevonden zich boven het wateroppervlak - een realistische weergave. Alleen de staven van 3 m werden in het water gebracht.



Figuur G-2 Model van de bij de beoordeling gebruikte drijvende PV-installatie: (a) bovenaanzicht van één drijvend platform; (b) bovenaanzicht van één drijvend platform; (c) drie drijvende platforms die met het kabelsysteem verbonden zijn met het HV-station aan land.

Bij alle beoordelingen is het geval van zoet water in acht genomen op basis van het volgende:

Watermodel: Uniforme weerstand van 0,1 S/m (10 Ω m)

Opmerking: De bodemweerstand is minder dan 10 Ω m op basis van DinoLoket-gegevens (zie Appendix F). Daarom is bij de veiligheidsbeoordeling een homogeen model van 10 Ω m toegepast.

Zoutwater

Uit de gepresenteerde analyse kwamen de volgende parameters naar voren:

- Bodemweerstand: 1 tot 6 Ω ·m (1 tot 0,2 S/m);

- Zeewater 5,5 S/m [8];

Opmerking: De opdrachtgever werd specifiek verzocht de veiligheid te beoordelen op basis van een voorgesteld geleidingsvermogen van 3 S/m (geleidingsvermogen dicht bij de kust). Dit laatste is gebruikt in de veiligheidsanalyse die in het volgende hoofdstuk wordt gepresenteerd.

Tabel G-1 geeft een overzicht van de stroomdichtheid van een tweelaagse geleidingsstructuur met twee elektroden aan het oppervlak. Eén elektrode introduceert een stroom in de structuur en de tweede elektrode extrudeert de stroom. De bovenste laag van de structuur vertegenwoordigt de waterlaag en de bijbehorende geleidbaarheid, terwijl de onderste laag de bodemlaag en de bijbehorende weerstand vertegenwoordigt.

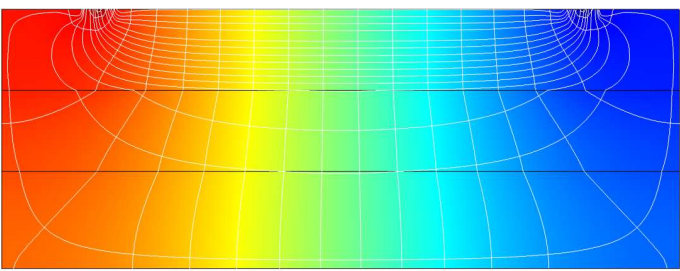
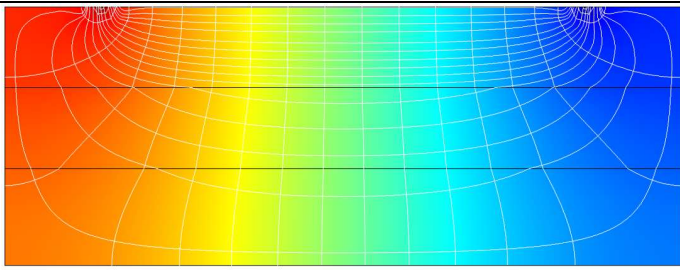
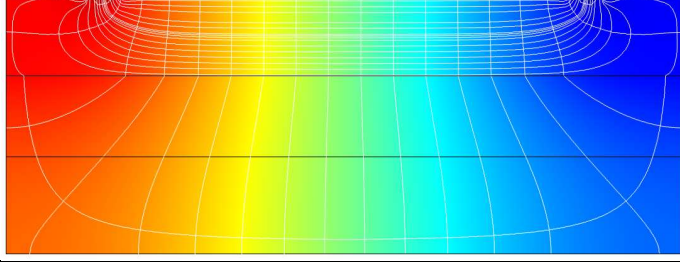
Bij de veiligheidsbeoordeling werd conservatief uitgegaan van het "slechtste geval". Het slechtste geval werd beschouwd als het geval met het sterkste elektrische veld. Het zwaartepunt van de beoordeling van het sterkste elektrische veld lag tussen twee elektroden en nabij het wateroppervlak (een locatie die representatief is voor die van de zwemmer).

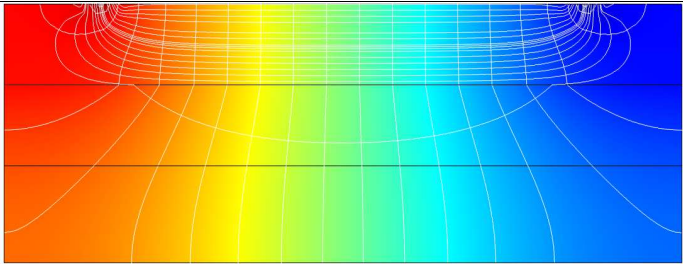
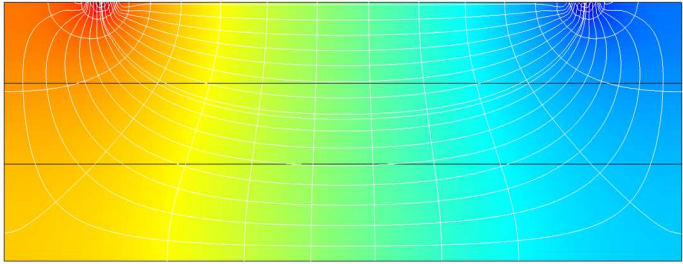
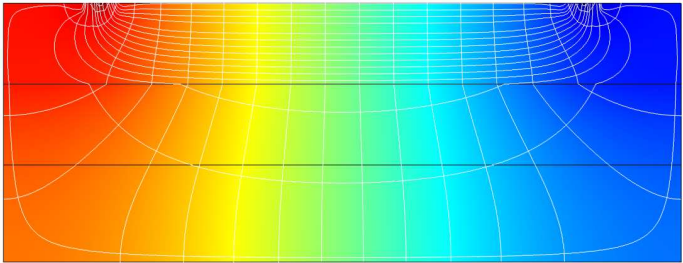
Het relatieve elektrische veld is weergegeven in tabel G-1 en is gebruikt bij de selectie van het slechtste geval.

Uit tabel G-1 blijkt dat het geval van zoet water (geval 5) en het uniforme model (Bodem: 1 Ω .m; Water: 1 S/m) zoals gebruikt in de veiligheidsbeoordeling, het slechtste geval voor zoet water oplevert.

Evenzo is in tabel G-1, geval 6, het uniforme model voor zeewater (Bodem: 0,3 Ω .m; Water: 3 S/m) het slechtste geval voor zeewater (zout water), en werd het gebruikt bij de veiligheidsbeoordeling.

Tabel G-1: Samenvatting van de stroomverdeling bij een tweelaagse geleidingsstructuur met twee elektroden aan het oppervlak.

nr.	Beschrijving	Huidige Dichtheid / Elektrisch Potentiaal Plot	Relatief Max. E-veld in het centrum
1	Bodem: 1 Ω .m; Water: 5,5 S/m		0,94
2	Bodem: 1 Ω .m; Water: 3 S/m		0,46
3	Bodem: 6 Ω .m; Water: 5,5 S/m		0,36

4	Bodem: 6 Ω .m; Water: 3 S/m		0,57
5	Bodem: 1 Ω .m; Water: 1 S/m		1,00
6	Bodem: 0,3 Ω .m; Water: 3 S/m		0,67

Bij alle beoordelingen voor het geval van zeewater is uitgegaan van het volgende:

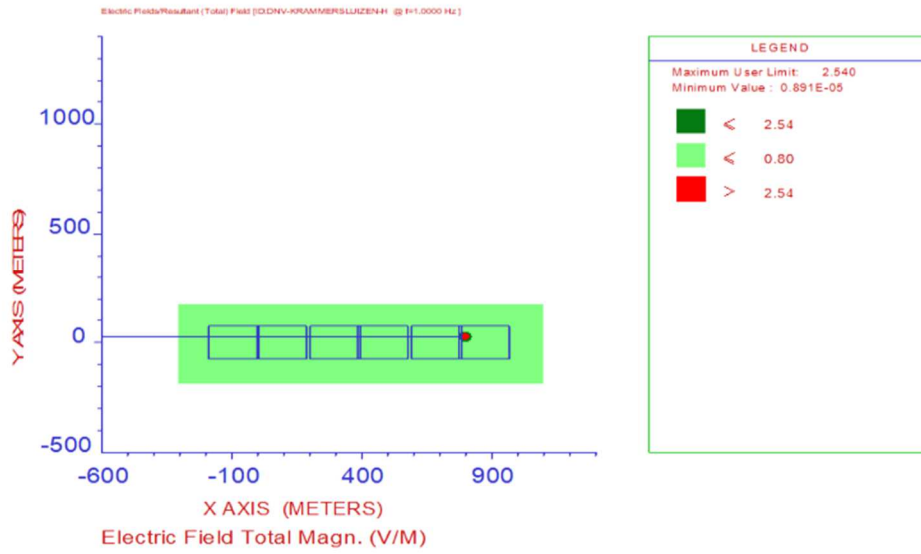
Watermodel: Uniforme weerstand van 3 S/m (0,333 Ω .m)

Opmerking: De bodem / zeewaterstructuur werd in het numerieke model beschouwd als een uniforme structuur op basis van geval 6 uit tabel 1, zoals eerder uitgelegd.

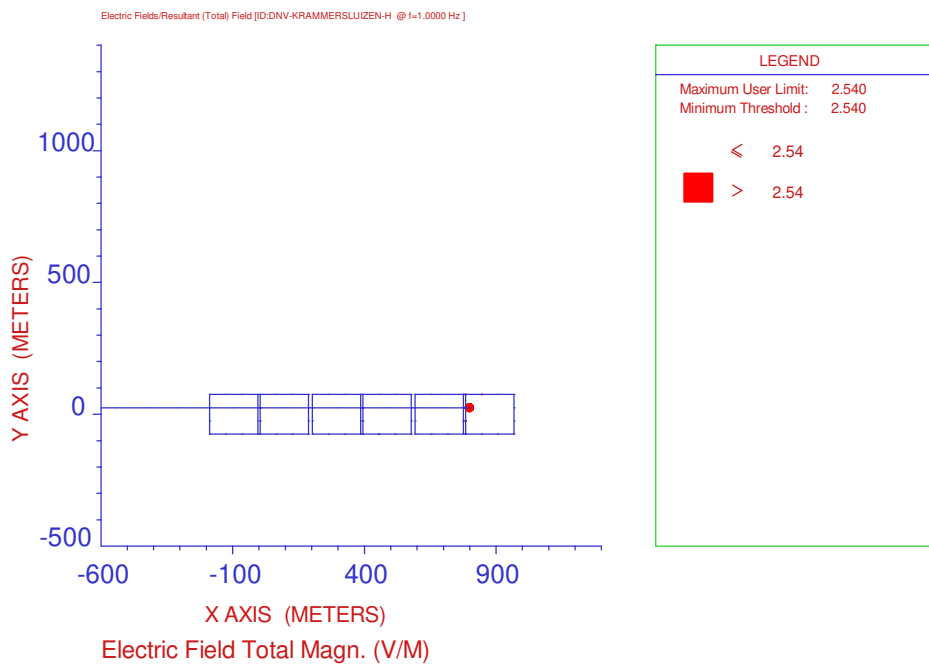
G-3 Veiligheidszone – Zoetwater scenario B-4(a)

De figuren G-3 en G-4 illustreren de veiligheidszones voor scenario B-4(a) op basis van de volgende parameters:

Water Model	: Uniforme weerstand van 0,1 S/m (10 Ω .m)
Lengte van de elektrode	: 3 m (in water)
Drempel elektrisch veld 1	: 2,54 V/m
Drempel elektrisch veld 2	: 0,8 V/m
Berekeningsdiepte elektrisch veld	: 200 mm
Stroom in aardingsstelsel in water	: 300 A (1 Hz) Geïnjecteerd

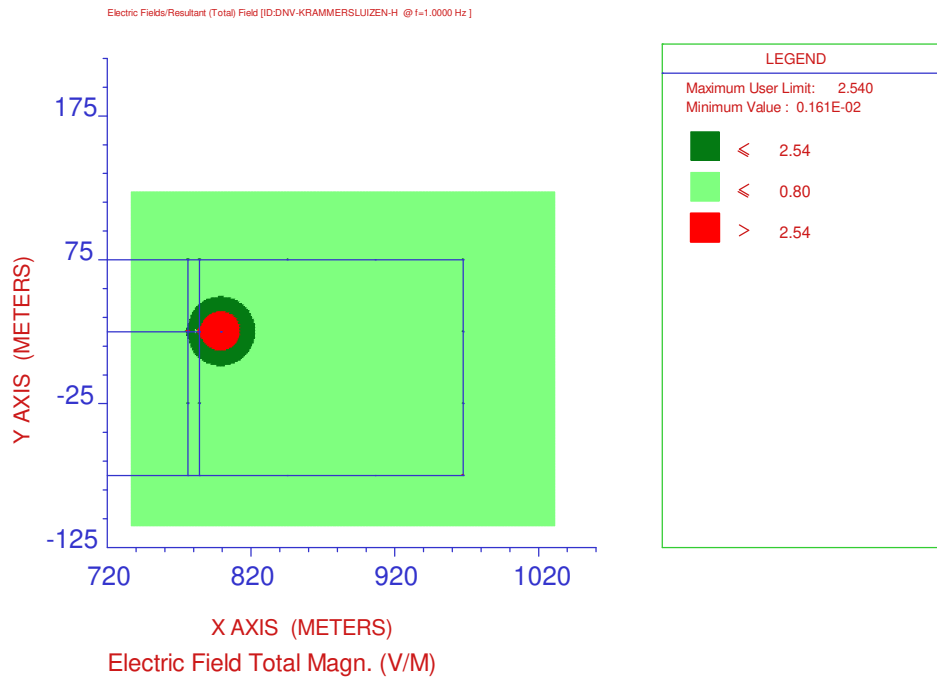


(a)

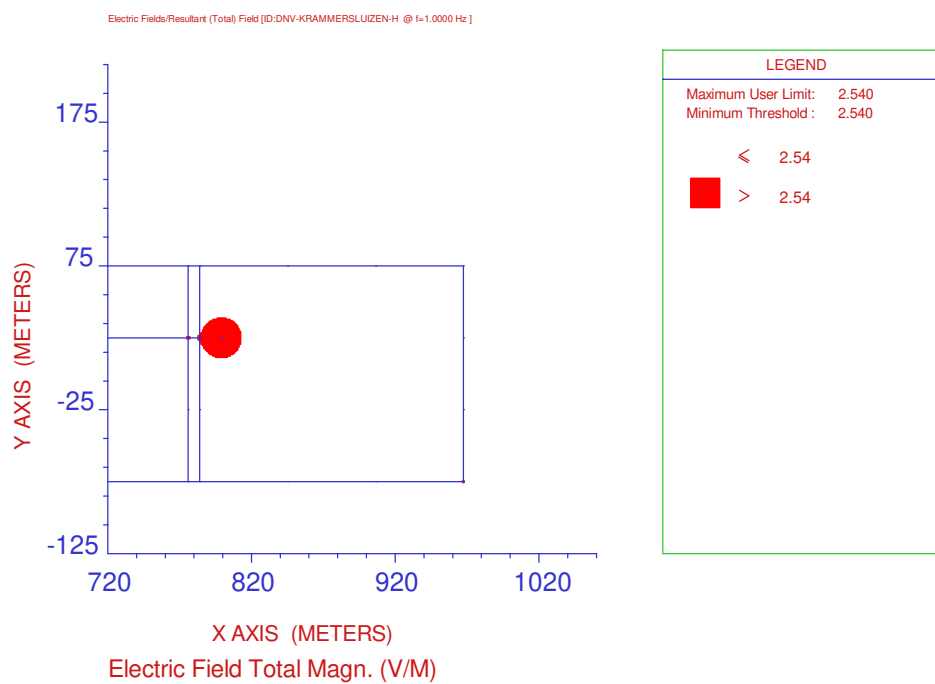


(b)

Figuur G-3 Veiligheidszones voor scenario B-4(a) voor de gehele drijvende PV-installatie.



(a)



(b)

Figuur G-4 Veiligheidszones voor scenario B-4(a) - ingezoomd beeld.

De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 14 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 2: 2,54 V/m).

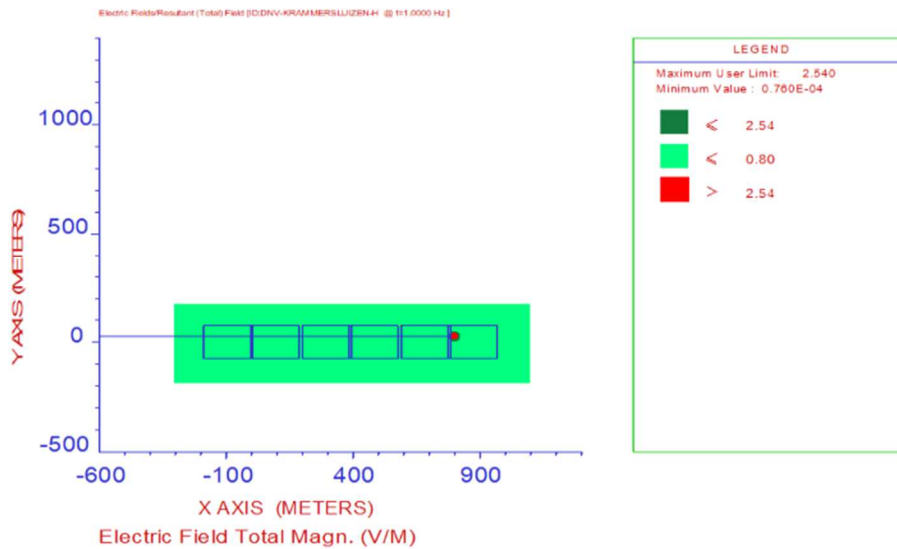
- Is ongeveer 25 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 1: 0,8 V/m).

De kleuren groen/wit geven het veilige gebied aan.

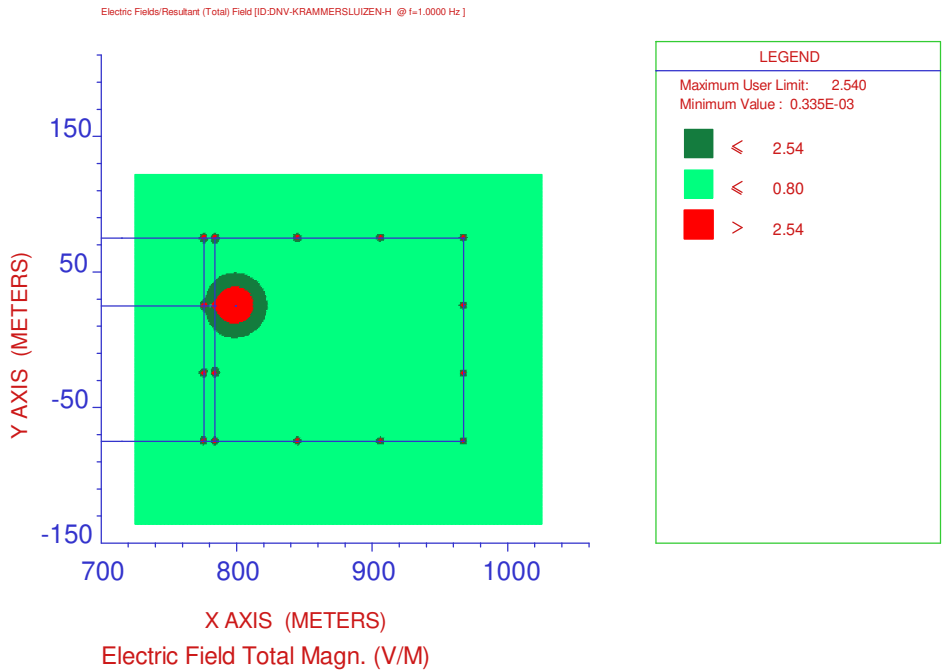
G-4 Veiligheidszone – Zoetwater scenario B-4(b)

De Figuren G-5 tot en met G-7 illustreren de veiligheidszones voor scenario B-4(b), op basis van de volgende parameters:

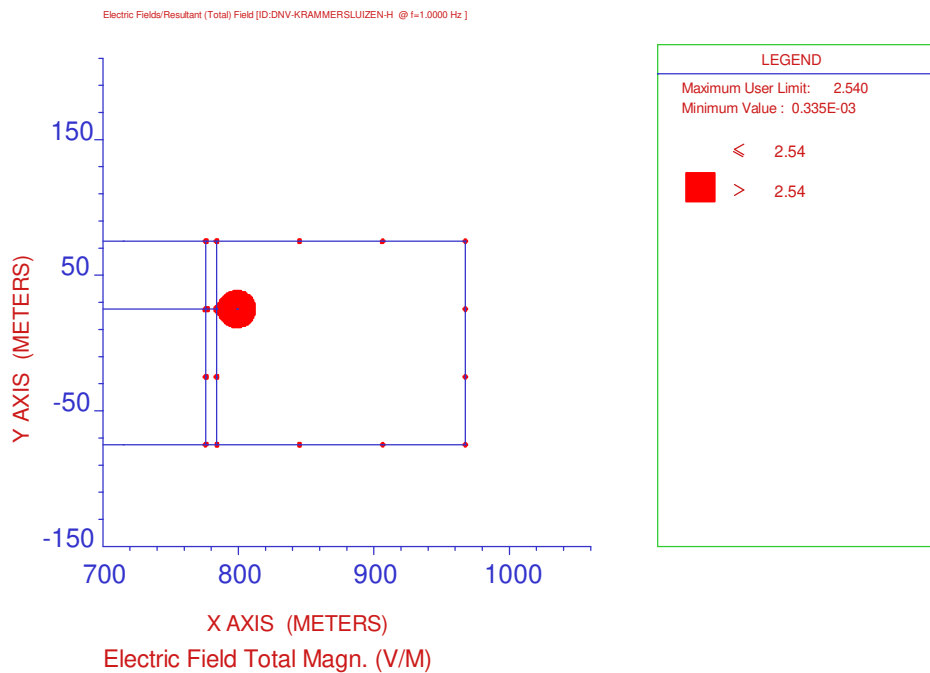
Water Model	: Uniforme weerstand van 0,1 S/m (10 Ωm)
Lengte van de elektrode	: 3 m (in water)
Drempel elektrisch veld 1	: 2,54 V/m
Drempel elektrisch veld 2	: 0,8 V/m
Berekeningsdiepte elektrisch veld	: 200 mm
Stroom in aardingssysteem in water	: 300 A (1 Hz) Geïnjecteerd en onttrokken



Figuur G-5 Veiligheidszones voor scenario B-4(b) voor de gehele drijvende PV-installatie.



(a)



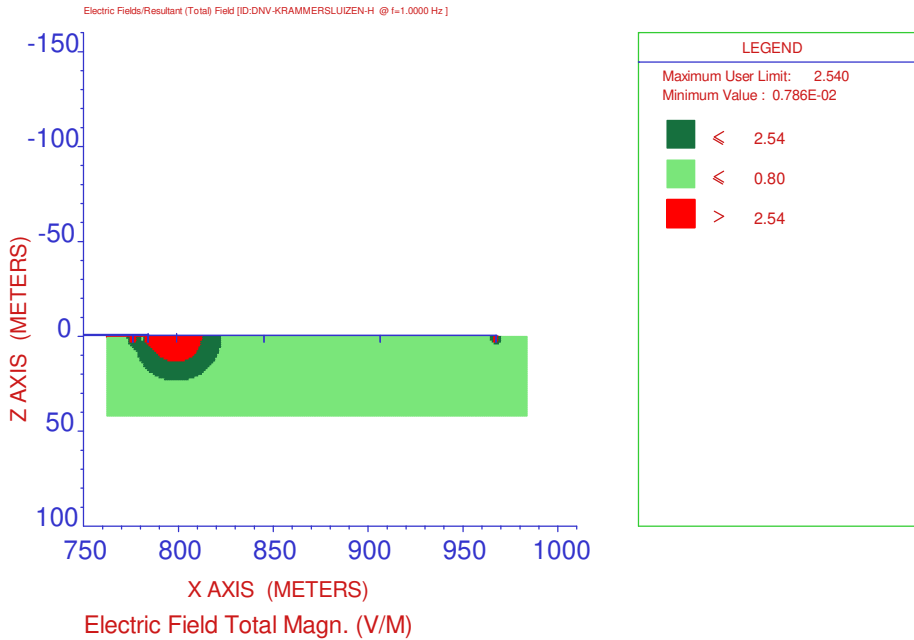
(b)

Figuur G-6 Veiligheidszones voor scenario B-4(b) - ingezoomd beeld.

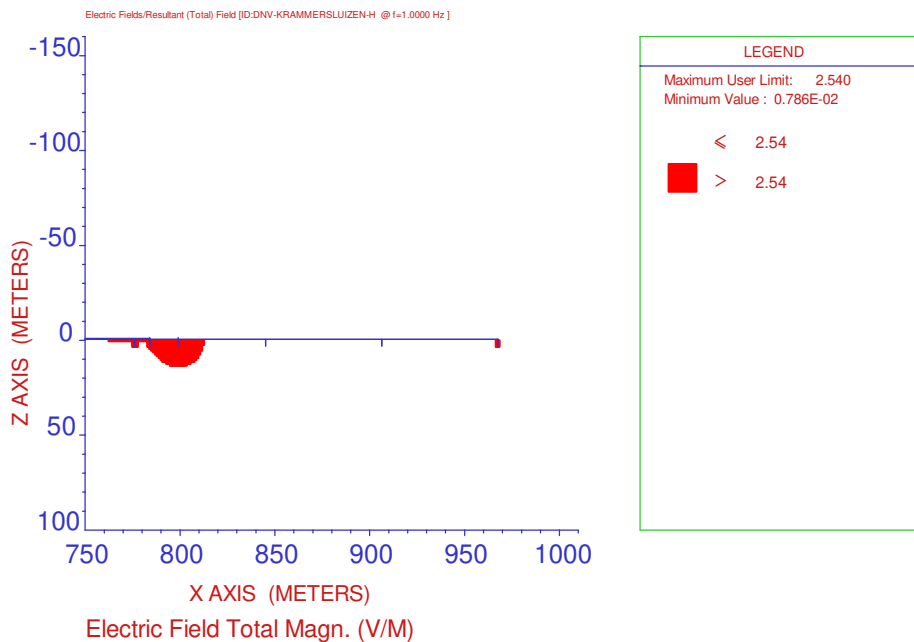
De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 14 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 2: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 25 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 1: 0,8 V/m).

De kleuren groen/wit geven het veilige gebied aan.



(a)



(b)

Figuur G-7 Veiligheidszones voor scenario B-4(b) - ingezoomd beeld - hoogtegrafiek.

De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 14 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 2: 2,54 V/m).

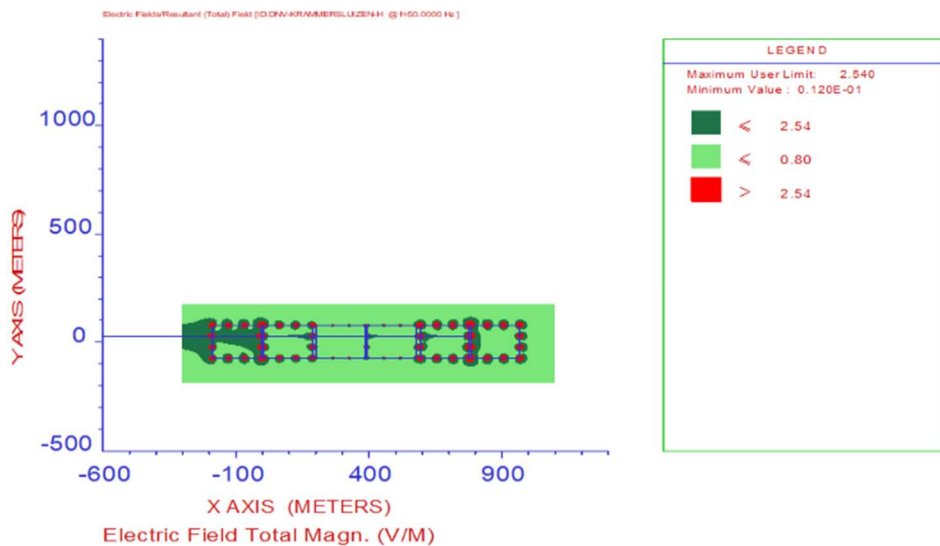
- Is ongeveer 25 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 1: 0,8 V/m).

De kleuren groen/wit geven het veilige gebied aan.

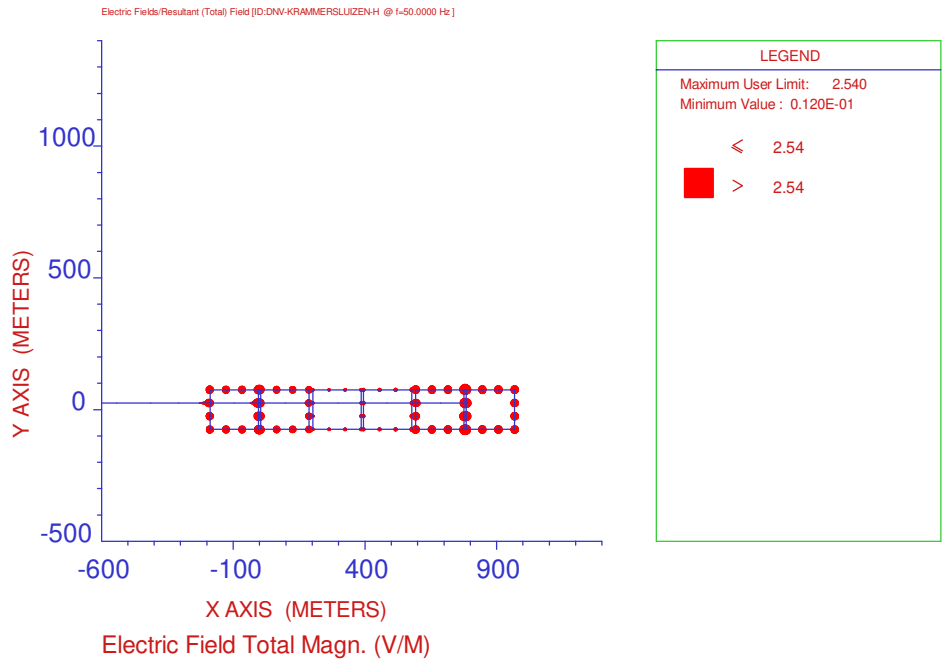
G-5 Veiligheidszone – Zoetwater scenario D-2

Figuren G-8 tot en met G-11 illustreren de veiligheidszones voor scenario D-2, op basis van de volgende parameters:

Water Model	: Uniforme weerstand van 0,1 S/m (10 Ωm)
Lengte van de elektrode	: 3 m (in water)
Drempel elektrisch veld 1	: 2,54 V/m
Drempel elektrisch veld 2	: 0,8 V/m
Berekeningsdiepte elektrisch veld	: 200 mm
Stroom naar aardingsysteem in water	: 7968 A (50 Hz)

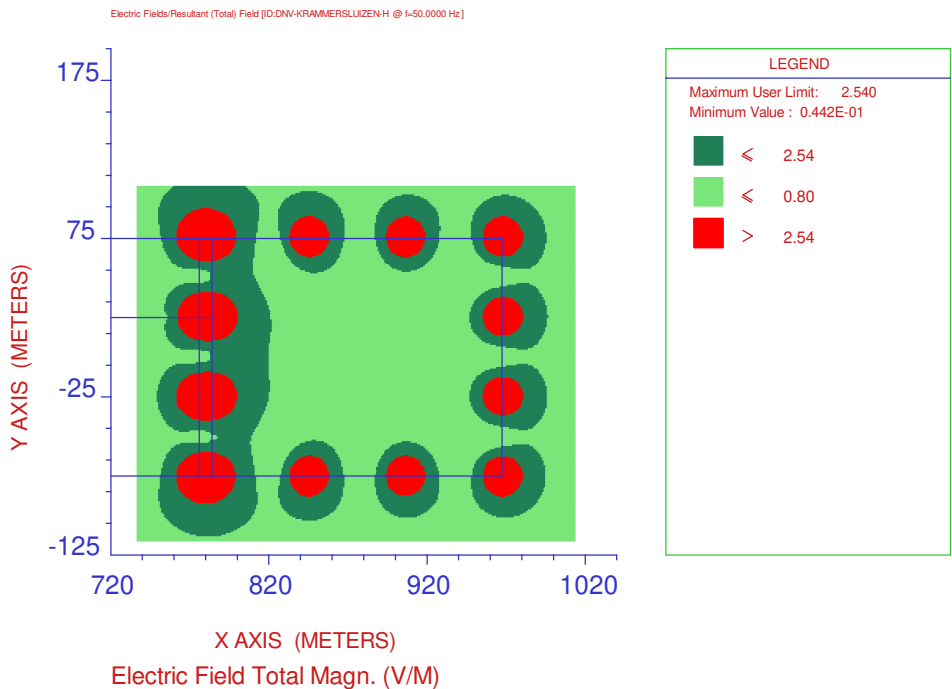


(a)

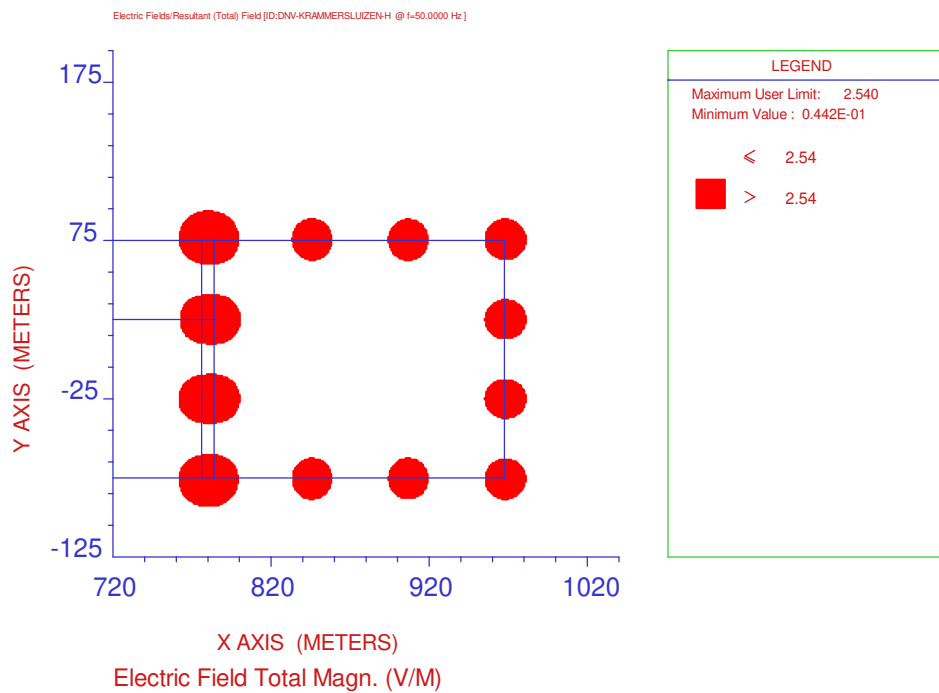


(b)

Figuur G-8 Veiligheidszones voor scenario D-2 voor de gehele drijvende PV-installatie.



(a)



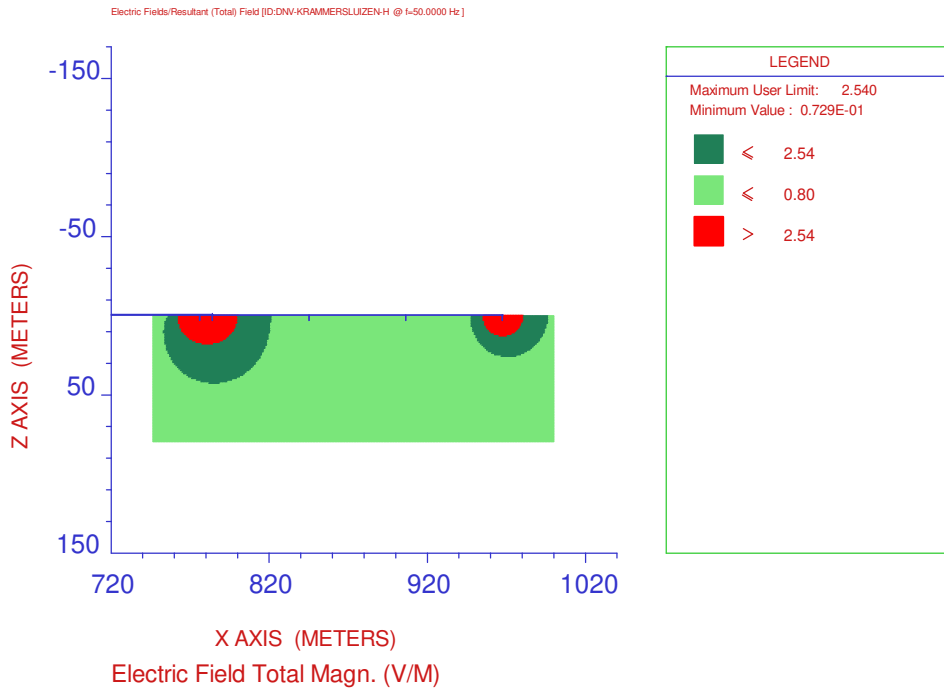
(b)

Figuur G-10 Veiligheidszones voor scenario D-2 - ingezoomd beeld.

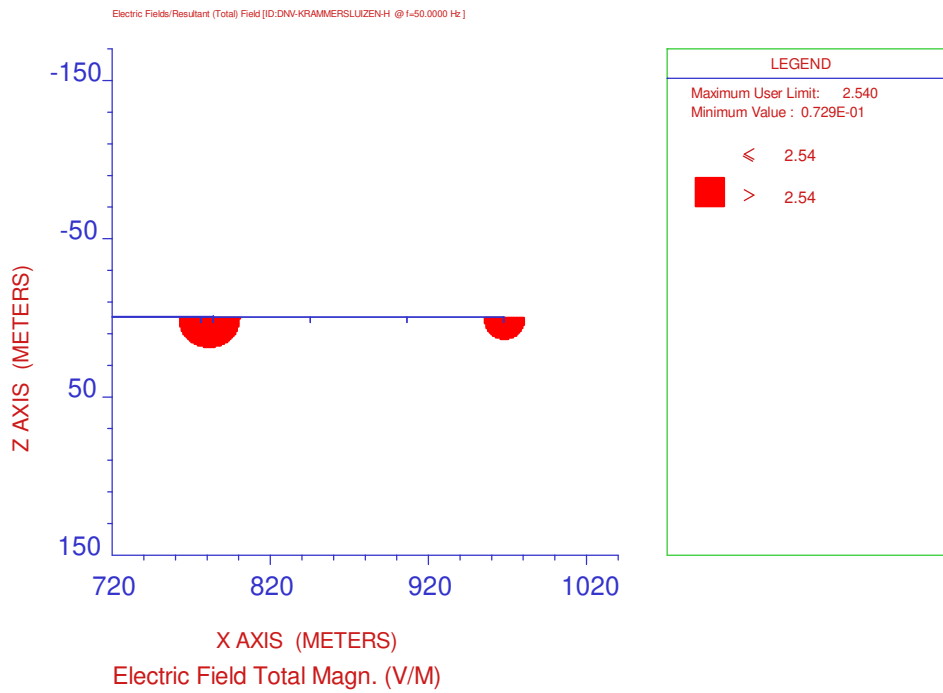
De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 19 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 2: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 36 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 1: 0,8 V/m).

De kleuren groen/wit geven het veilige gebied aan.



(a)



(b)

Figuur G-11 Veiligheidszones voor scenario D-2 - ingezoomd beeld - hoogtografiek.

De straal van de getroffen zone:

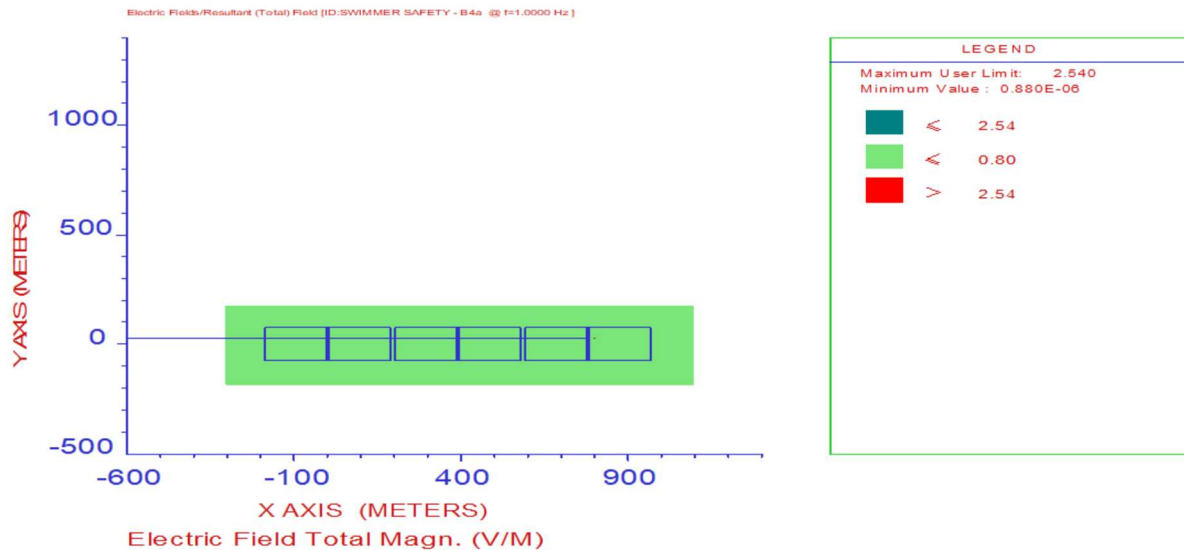
- Is ongeveer 19 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 2: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 36 m van de plaats van het defect (voor veiligheids criterium 1: 0,8 V/m).

De kleuren groen/wit geven het veilige gebied aan.

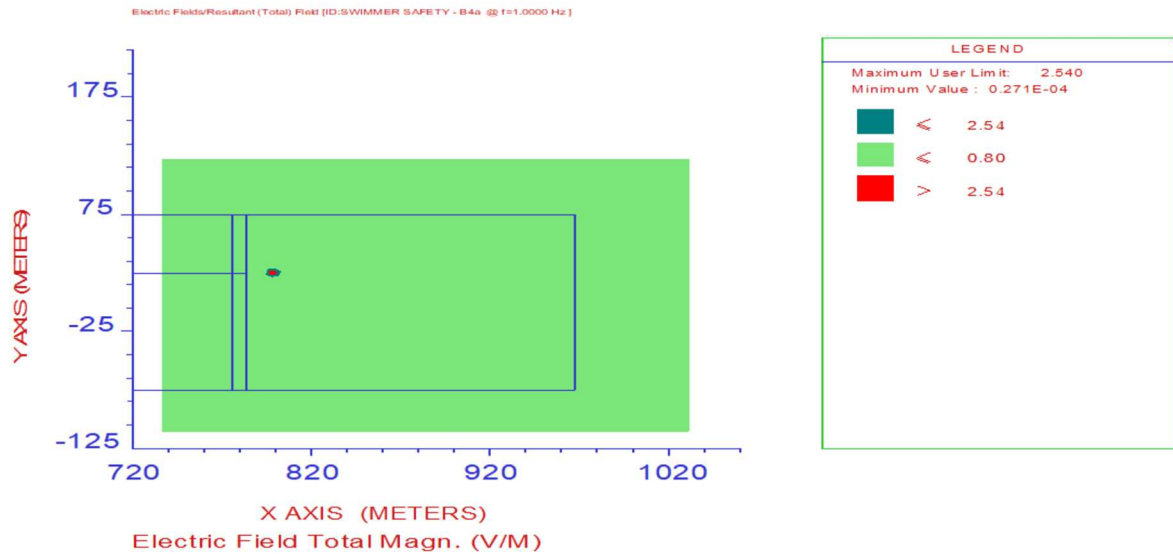
G-6 Veiligheidszone – Zoutwater scenario B-4(a)

Figuur G-12 illustreert de veiligheidszones voor scenario B-4(a), op basis van de volgende parameters:

Water Model	: Uniforme weerstand van 3 S/m (0,333 Ω m)
Lengte van de elektrode	: 3 m (in water)
Drempel elektrisch veld 1	: 2,54 V/m
Drempel elektrisch veld 2	: 0,8 V/m
Berekeningsdiepte elektrisch veld	: 200 mm
Stroom in aardingssysteem in water	: 300 A (1 Hz) Geïnjecteerd



(a)



(b)

Figuur G-12: Veiligheidszones voor scenario B-4(a) voor de gehele drijvende PV-installatie.

De straal van de getroffen zone:

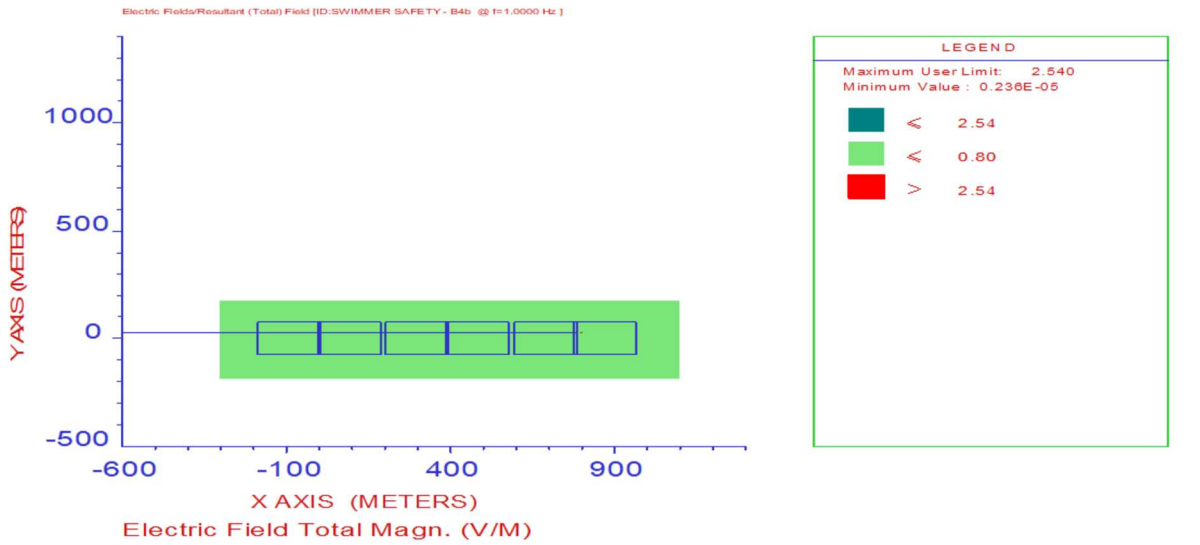
- Is ongeveer 4 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 1: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 6 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 2: 0,8 V/m).

De kleuren groen geven het veilige gebied aan.

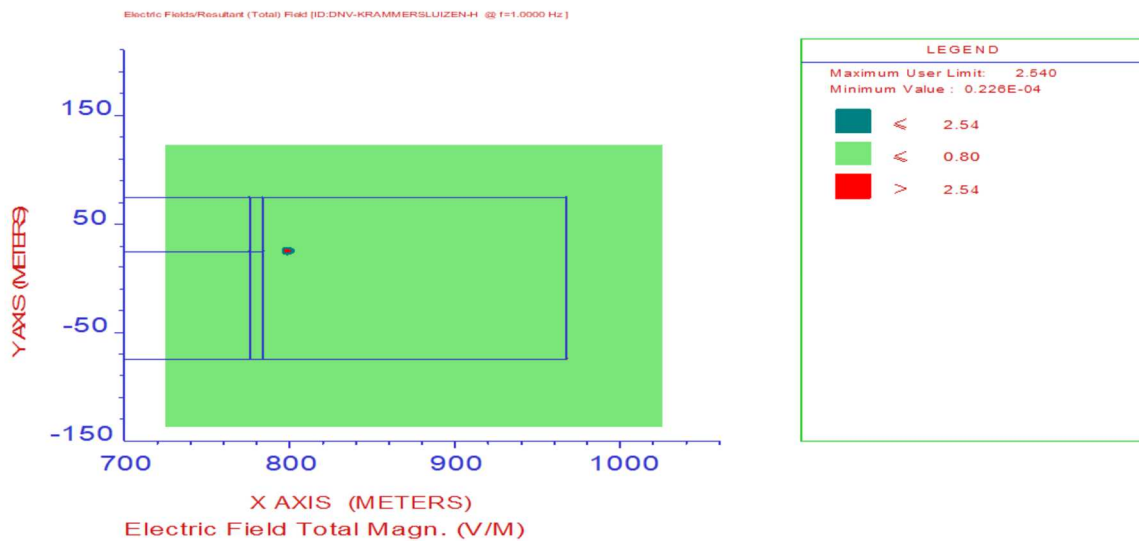
G-7 Veiligheidszone – Zoutwater scenario B-4(b)

De figuren G-13 en G14 illustreren de veiligheidszones voor scenario B-4(b), op basis van de volgende parameters:

Water Model	: Uniforme weerstand van 3 S/m (0,333 Ω m)
Lengte van de elektrode	: 3 m (in water)
Drempel elektrisch veld 1	: 2,54 V/m
Drempel elektrisch veld 2	: 0,8 V/m
Berekeningsdiepte elektrisch veld	: 200 mm
Stroom in aardingssysteem in water	: 300 A (1 Hz) Geïnjecteerd en onttrokken



(a)



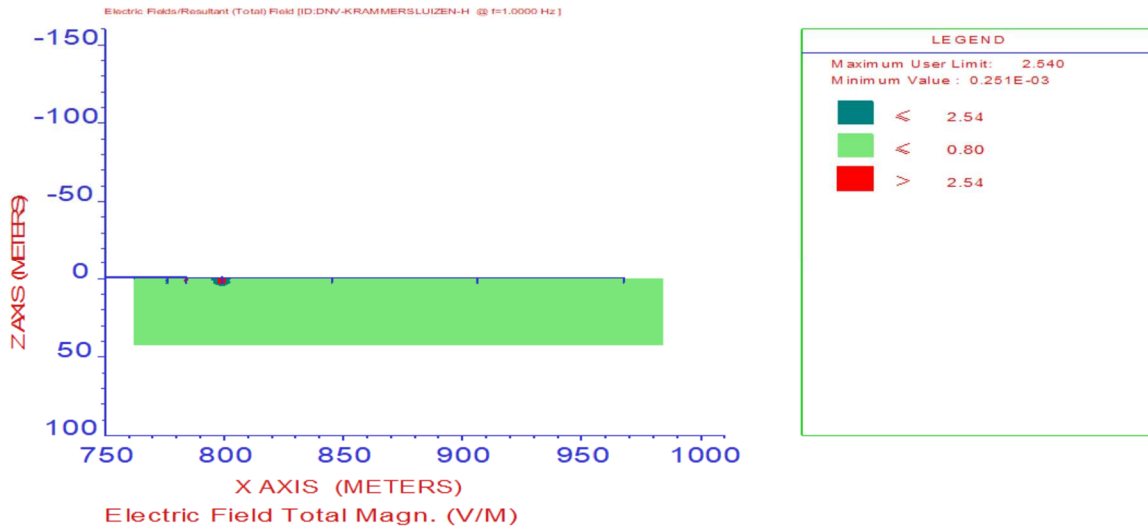
(b)

Figuur G-13: Veiligheidszones voor scenario B-4(b) voor de gehele drijvende PV-installatie.

De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 4 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 1: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 6 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 2: 0,8 V/m).

De kleuren groen geven het veilige gebied aan.



Figuur G-14: Veiligheidszones voor scenario B-4(b - ingezoomd beeld - hoogtegrafiek.

De straal van de getroffen zone:

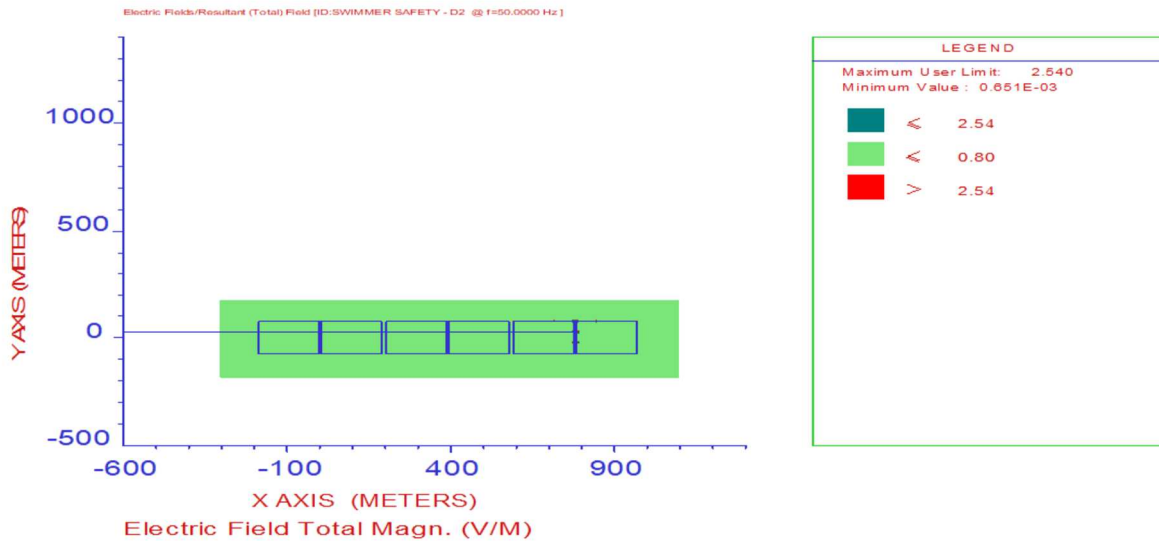
- Is ongeveer 4 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 1: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 6 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 2: 0,8 V/m).

De kleuren groen geven het veilige gebied aan.

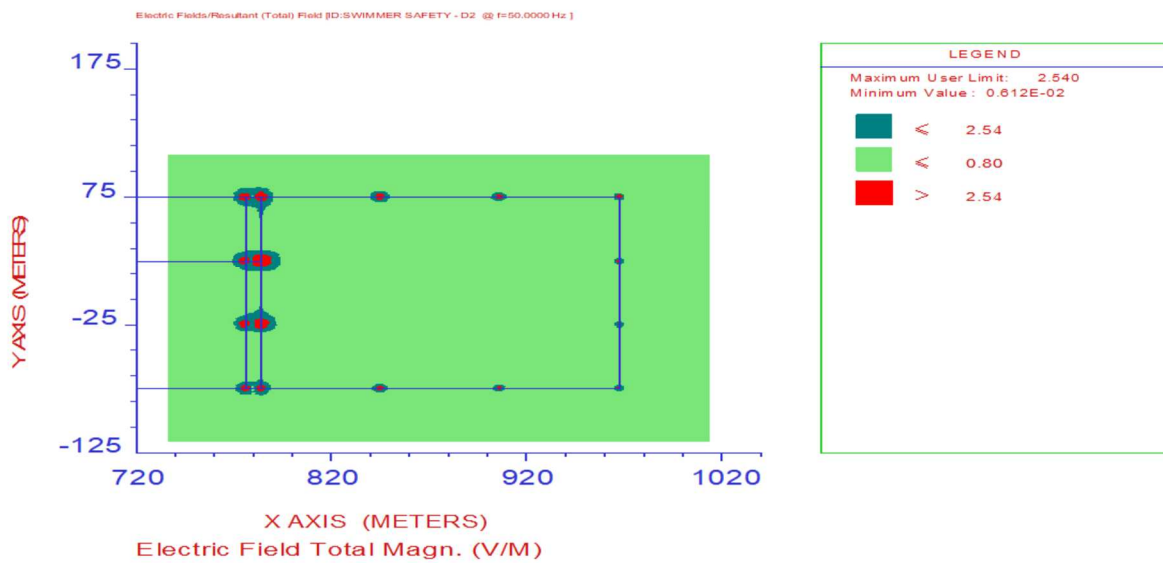
G-8 Veiligheidszone – Zoutwater scenario D-2

De figuren G-15 en G-16 illustreren de veiligheidszones voor scenario D-2, op basis van de volgende parameters:

Water Model	: Uniforme weerstand van 3 S/m (0,333 Ω.m)
Lengte van de elektrode	: 3 m (in water)
Drempel elektrisch veld 1	: 2,54 V/m
Drempel elektrisch veld 2	: 0,8 V/m
Berekeningsdiepte elektrisch veld	: 200 mm
Stroom naar aardingssysteem in water	: 7968 A (50 Hz)



(a)



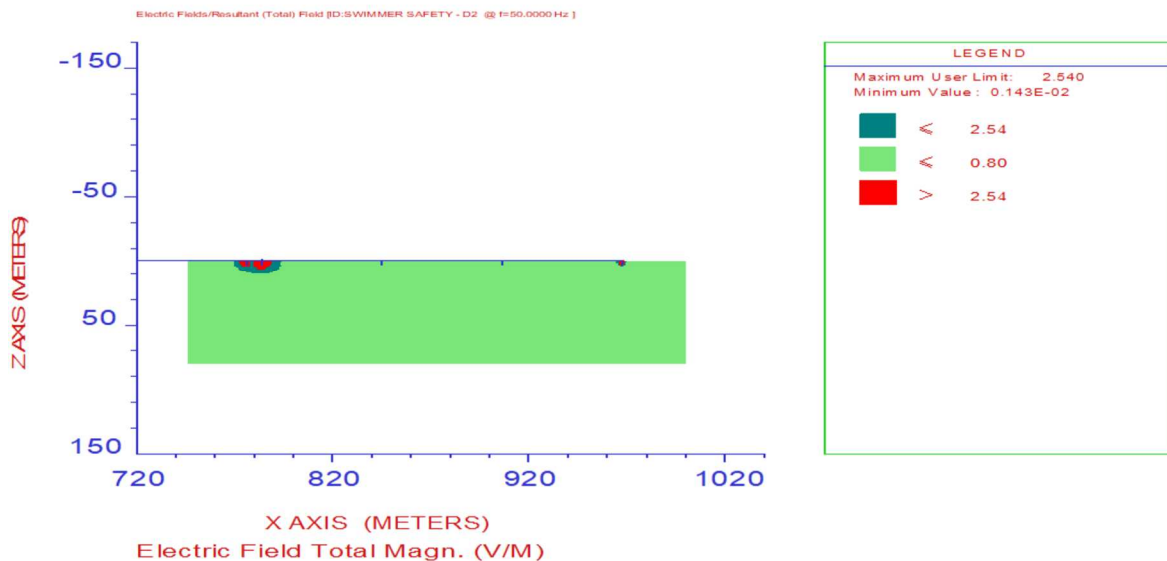
(b)

Figuur G-15: Veiligheidszones voor scenario D-2 voor de gehele drijvende PV-installatie.

De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 9 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 1: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 12 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 2: 0,8 V/m).

De kleuren groen geven het veilige gebied aan.



Figuur G-16: Veiligheidszones voor scenario D-2 - ingezoomd beeld - hoogtegrafiek.

De straal van de getroffen zone:

- Is ongeveer 9 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 1: 2,54 V/m).
- Is ongeveer 12 m van de plaats van de storing (voor veiligheids criterium 2: 0,8 V/m).

De kleuren groen geven het veilige gebied aan.

G-9 Slotopmerkingen

De beoordeling van de veiligheid van zwemmers nabij een drijvende PV-installatie in zowel zoet- als zoutwater werd in dit verslag behandeld.

De veiligheids criteria omvatten:

- Veiligheids criterium 1: Een elektrisch veld in het water van 0,8 V/m op basis van een complexere contactstroombeoordeling.
- Veiligheids criterium 2: Een elektrisch veld in het water van 2,54 V/m op basis van een marge van 47 % die is gebaseerd op de gegevens van Carghill (2017) /8/.

Opmerkingen Zoetwater

Op basis van de slechtst denkbare foutcondities bij de drijvende PV-installatie die in dit verslag worden gepresenteerd, strekt de straal van de veiligheidszone in zoetwater zich uit:

- Ongeveer 19 m van de plaats van het defect voor veiligheids criterium 2: 2,54 V/m;
- Ongeveer 36 m van de plaats van het defect voor veiligheids criterium 1: 0,8 V/m.

Op basis van het bovenstaande, met een extra veiligheidsmarge van 10%, wordt aanbevolen een veiligheidsbarrière / waarschuwingsborden in te voeren op de volgende afstanden van de drijvende PV-installatie:

- Ongeveer (19 m x 1,1 =) 21 m op basis van veiligheids criterium 2: 2,54 V/m;

- Ongeveer (36 m x 1,1 =) 40 m op basis van veiligheids criterium 1: 0,8 V/m.

Opmerkingen Zoutwater

Op basis van de slechtst denkbare foutcondities bij de drijvende PV-installatie die in dit verslag worden gepresenteerd, strekt de straal van de veiligheidszone in zoutwater zich uit:

- Ongeveer 9 m op basis van veiligheids criterium 2: 2,54 V/m;
- Ongeveer 12 m op basis van veiligheids criterium 1: 0,8 V/m.

Op basis van het bovenstaande, met een extra veiligheidsmarge van 10%, wordt aanbevolen een veiligheidsbarrière / waarschuwingsborden in te voeren op de volgende afstanden van de drijvende PV-installatie:

- Ongeveer 10 m op basis van veiligheids criterium 2: 2,54 V/m;
- Ongeveer 13 m op basis van veiligheids criterium 1: 0,8 V/m.



About DNV

DNV is the independent expert in risk management and assurance, operating in more than 100 countries. Through its broad experience and deep expertise DNV advances safety and sustainable performance, sets industry benchmarks, and inspires and invents solutions.

Whether assessing a new ship design, optimizing the performance of a wind farm, analyzing sensor data from a gas pipeline or certifying a food company's supply chain, DNV enables its customers and their stakeholders to make critical decisions with confidence.

Driven by its purpose, to safeguard life, property, and the environment, DNV helps tackle the challenges and global transformations facing its customers and the world today and is a trusted voice for many of the world's most successful and forward-thinking companies.