Duurzame Energie Dam

Afstudeeronderzoek







Datum
22 augustus 2008

Naam
Ing. D. Wondergem

Duurzame Energie Dam

Afstudeeronderzoek

Datum
22 augustus 2008

Naam
Ing. D. Wondergem — Technische Universiteit Delft *(faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen)*

Studentennummer
C1272586

E-mailadres
dennis.wondergem@gmail.com

Afstudeercommissie
Prof.drs.ir. J.K. Vrijling — Technische Universiteit Delft *(faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen)*
Ir. H.J. Verhagen — Technische Universiteit Delft *(faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen)*
Prof.dr.ir. J.C. Brezet — Technische Universiteit Delft *(faculteit Industrieel Ontwerpen)*
Ir. D.V. Geelen — Technische Universiteit Delft *(faculteit Industrieel Ontwerpen)*
Ing. K.J. Hoekstra — The Sun Factory

documentnaam	versie	status	datum
rapport - totaal (concept).docx	A	concept	22 augustus 2008

Voorwoord

Samenvatting

Summary

Inhoudsopgave

Voorwoord ..... **IV**

Samenvatting ..... **V**

Summary ..... **VI**

Lijst van figuren ..... **XIII**

Lijst van tabellen ..... **XV**

Lijst van symbolen ..... **XVII**

1 Inleiding **1**

1.1 Aanleiding 1
1.2 Probleemanalyse 1
1.2.1 Onderzoeksvraag *1*
1.2.2 Doelstellingen *1*
1.3 Werkwijze 2
1.4 Leeswijzer 2

2 Waterkeringen **4**

2.1 Inleiding 4
2.2 Waterkeringen in Nederland 4
2.2.1 Algemeen *4*
2.2.2 Indeling van waterkeringen *4*
2.2.3 Dijkopbouw *5*
2.3 Belastingen 8
2.3.1 Dijklichaam *8*
2.3.2 Kunstwerken en bijzondere constructies *8*
2.4 Faalmechanismen 9
2.4.1 Grondconstructies *9*
2.4.2 Faalmechanismen bijzondere constructies en kunstwerken *11*
2.4.3 Faalmechanismen objecten *11*
2.4.4 Faalmechanismen bekledingen *12*
2.5 Toetsing waterkeringen 12
2.6 De Afsluitdijk 12
2.6.1 Geschiedenis van de Afsluitdijk *12*
2.6.2 Waterkering de Afsluitdijk *12*
2.6.3 Vijfjaarlijkse toetsing Afsluitdijk *14*
2.6.4 Analyse toetsresultaten Afsluitdijk *15*
2.7 Conclusie 18

3 Verbeteringsmaatregelen **19**

3.1 Inleiding 19
3.2 Verbeteringsmaatregelen 19
3.2.1 Variant 0: nulsituatie *19*
3.2.2 Variant 1: aanpassen waterkering *20*
3.2.3 Variant 2: plaatsen nieuwe waterkering *22*

3.2.4 Combinaties ... 23
3.3 Verbeteringsmaatregelen Afsluitdijk ... 23
3.3.1 Toelichting aspecten vergelijking ... 23
3.3.2 Variant 0: nulsituatie Afsluitdijk ... 25
3.3.3 Variant 1: aanpassen Afsluitdijk ... 27
3.3.4 Variant 2: plaatsen nieuwe waterkering ... 34
3.3.5 Combinaties ... 36
3.4 Conclusie ... 37
3.4.1 Algemeen ... 37
3.4.2 Afsluitdijk ... 37

4 Energieconversie ... 39

4.1 Inleiding ... 39
4.2 Samenvatting ... 40

5 Fotovoltaïsche zonnepanelen ... 41

5.1 Inleiding ... 41
5.2 Zonnepanelen ... 41
5.2.1 Opbouw zonnepanelen ... 41
5.2.2 Bevestiging ... 42
5.3 Functies ... 43
5.4 Invloeden ... 43
5.4.1 Invloeden van zonnepanelen ... 43
5.4.2 Invloeden op zonnepanelen ... 44
5.5 Belastingen ... 44
5.6 Fotovoltaïsche zonnepanelen op de Afsluitdijk ... 45
5.6.1 Wegnemen van zonlicht ... 45
5.6.2 Reflectie van zonlicht ... 45
5.6.3 Afvoer van water ... 46
5.7 Conclusie ... 46

6 Gegevens en randvoorwaarden ... 47

6.1 Inleiding ... 47
6.2 Gegevens ... 47
6.2.1 Geometrie ... 47
6.2.2 Ligging Afsluitdijk ... 48
6.2.3 Bodemopbouw Afsluitdijk ... 48
6.2.4 Peilen en getijdengegevens ... 48
6.2.5 Materialen ... 48
6.3 Algemene randvoorwaarden ... 49
6.4 Belastingen ... 49
6.4.1 Dijklichaam ... 49
6.4.2 Kunstwerken en bijzondere constructies ... 52
6.5 Constructieve randvoorwaarden ... 53
6.6 Randvoorwaarden bekleding ... 54
6.7 Randvoorwaarden fotovoltaïsche zonnepanelen ... 54
6.8 Randvoorwaarden cultuurhistorie en natuur ... 54
6.9 Conclusie ... 55

7 Toetspunten integrale oplossingen ... 56

7.1 Inleiding 56
7.2 Kruinhoogte 56
7.3 Golfoploophoogte en golfoverslaghoogte 57
7.3.1 Golfoploophoogte 57
7.3.2 Golfoverslaghoogte 58
7.4 Laagdikte en stroomsnelheid van overslag 59
7.4.1 Theorie van Schüttrumpf 60
7.4.2 Theorie van Van Gent 62
7.4.3 Theorie van Bosman 64
7.5 Piping en heave 66
7.6 Macrostabiliteit binnenwaarts 66
7.7 Macrostabiliteit buitenwaarts 67
7.8 Microstabiliteit 67
7.9 Stabiliteit voorland 68
7.10 Stabiliteit bekleding 69
7.10.1 Gras (klei) 69
7.10.2 Losgestorte materialen 69
7.10.3 Verpakte bekledingen 71
7.10.4 Gezette bekledingen en blokkenmatten 71
7.10.5 Plaatbekledingen 72
7.10.6 Asfaltbekledingen 73
7.10.7 Overige bekledingen en materialen 73
7.11 Conclusie 73

8 Integrale oplossingen 74

8.1 Inleiding 74
8.2 Locaties 74
8.2.1 Voorland 75
8.2.2 Benedenbeloop 75
8.2.3 Buitenberm 75
8.2.4 Bovenbeloop 75
8.2.5 Kruin 76
8.2.6 Hoog binnentalud 77
8.2.7 Binnenberm 77
8.2.8 Laag binnentalud 77
8.2.9 Achterland 77
8.3 Bevestiging zonnepanelen 77
8.3.1 Palenfundering 78
8.3.2 Dijkbekleding als fundering 78
8.4 Integrale oplossingen Afsluitdijk 81
8.4.1 Algemene kenmerken integrale ontwerp 81
8.4.2 Zonnepanelen op buitentalud (onbelaste zone) 84
8.4.3 Zonnepanelen op binnentalud 88
8.5 Conclusie 96

9 Conclusie 97

9.1 Conclusie 97
9.2 Resultaten 97
9.3 Aanbevelingen 97

Referenties 99

APPENDICES ..... **I**

A Geschiedenis Afsluitdijk ..... **II**

B Overzichtskaart Afsluitdijk ..... **III**

C Waterkaart ..... **IV**

C.1 Overzichtskaart Afsluitdijk IV
C.2 Waterkaart hydraulische randvoorwaarden V

D Resultaten veiligheidstoetsing 2006 ..... **VII**

D.1 Toetsresultaten VII
D.2 Toelichting resultaten VIII
D.2.1 Bevindingen beheerder ..... *VIII*
D.2.2 Bevindingen provincie ..... *IX*
D.2.3 Bevinding Rijk ..... *IX*

E Beoordelingsschema toetsresultaten ..... **X**

F Toelichting toetsresultaten ..... **XII**

F.1 Hoogte XII
F.1.1 Overslagdebiet ..... *XII*
F.1.2 Kruinhoogtemarge ..... *XII*
F.1.3 Gedetailleerde toets erosie door golfoverslag ..... *XIII*
F.1.4 Gedetailleerde toets op afschuiven ..... *XIV*
F.1.5 Eindscore hoogte ..... *XV*
F.2 Stabiliteit XVI
F.2.1 Piping en heave ..... *XVI*
F.2.2 Macrostabiliteit binnenwaarts ..... *XVIII*
F.2.3 Macrostabiliteit buitenwaarts ..... *XIX*
F.2.4 Microstabiliteit ..... *XX*
F.2.5 Stabiliteit bekleding ..... *XXI*
F.2.6 Voorland ..... *XXII*
F.2.7 Eindscore stabiliteit ..... *XXII*
F.3 Niet-waterkerende objecten XXIII

G Overzicht bekleding ..... **XXIV**

G.1 Toepassing toplaag en bijbehorende onderlaag XXIV
G.2 Keuze geokunststof of granulair filter XXV
G.3 Keuze soort geokunststof of granulair filter en dimensionering XXV
G.3.1 Keuze soort geokunststof ..... *XXV*
G.3.2 Toepassen Folies ..... *XXVI*
G.4 Faalmechanismen steenbekleding XXVI
G.4.1 Falen steenzetting door toplaaginstabiliteit ..... *XXVI*
G.4.2 Falen steenzetting door afschuiving ..... *XXVII*
G.4.3 Falen steenzetting door materiaaltransport ..... *XXVII*

H Steenbekleding op kruin en binnentalud ..... **XXVIII**

H.1 Onderzoek steenbekleding op kruin en binnentalud XXVIII

I Energieconversie XXXI

I.1 Introductie Energie 1
I.1.1 Algemeen 1
I.1.2 Dimensie 1
I.1.3 Energiebronnen 1
I.1.4 Duurzame, groene, hernieuwbare en alternatieve energie 2
I.1.5 Elektriciteit 4
I.1.6 Verbruikers 4
I.2 Toelichting aspecten voor vergelijking 6
I.3 Energie uit brandstoffen 7
I.3.1 Gas 7
I.3.2 Kolen (inclusief biomassa) 8
I.4 Kernenergie 10
I.5 Energie uit water 11
I.5.1 Waterkracht 11
I.5.2 Getijden 15
I.5.3 Golfslag 19
I.5.4 Zoutgradiënt 25
I.5.5 Temperatuurgradiënt 28
I.5.6 Magnetohydrodynamica 29
I.6 Zonne-energie 30
I.6.1 Fotovoltaïsch 30
I.6.2 Thermisch 33
I.6.3 Thermisch-elektrisch 33
I.7 Windenergie 34
I.7.1 Mechanisch 34
I.7.2 Elektrostatisch 36
I.8 Aardwarmte 38
I.9 Conclusie 39
I.9.1 Algemeen 39
I.9.2 De Afsluitdijk 39
I.9.3 Multicriteria analyse 39
I.9.4 Eindoordeel 41
I.10 Appendix I-A: Schema energieconversie 44
I.11 Appendix I-B: Overzicht huidige gas-/kolen-/kernenergiecentrales Nederland 46
I.12 Appendix I-C: Overzicht geplande gas- en kolenenergiecentrales Nederland 48
I.13 Appendix I-D: Overzicht huidige waterkrachtcentrales in Nederland 49
I.14 Appendix I-E: Overzicht huidige zonnestroomprojecten in Nederland 50
I.15 Appendix I-F: Overzicht huidige windenergiecentrales in Nederland 52
I.16 Appendix I-G: Overzicht geplande windenergiecentrales in Nederland 53
I.17 Appendix I-H: Overzicht huidige energiebronnen in Nederland 54
I.18 Appendix I-I: Overzicht potentieel aan energie voor de Afsluitdijk 55

J Stromingskaart Waddenzee XXXII

K Geometrie Afsluitdijk XXXIII

L Ligging Afsluitdijk XXXV

M Grondmechanische gegevens Afsluitdijk XXXVII

N Gegevens Waddenzee en IJsselmeer XXXIX

N.1 Waddenzee XXXIX
N.2 IJsselmeer XXXIX

O Berekening golfhoogte bij buitenteen Afsluitdijk XL

O.1 Ingevoerde parameters XL
O.2 Resultaten XL

P Belasting op zonnepanelen door neerslag en wind XLIII

P.1 Neerslagbelasting XLIII
P.2 Windbelasting XLIII

Q Uitzettingscoëfficiënten constructiematerialen XLV

R Berekening kruinhoogte XLVI

R.1 Maatgevend hoogwater ($h_{mhw;2001}$) XLVI
R.2 Hoogwaterstijging (h_{hws}) XLVII
R.3 Toeslagen (h_t) XLVII
R.4 Golfoverslaghoogte (h_{ovs}) XLVII
R.5 Bodemdaling (h_{bd}) XLVII
R.6 Kruindaling (h_{kd}) XLVII
R.7 Kruinhoogte XLVIII

S Berekening golfoploop en golfoverslag (handmatig) XLIX

S.1 Golfkarakteristieken XLIX
S.1.1 Gemiddelde taludhelling XLIX
S.2 Golfoploophoogte XLIX
S.2.1 Invloedsfactor berm (γ_b) L
S.2.2 Invloedsfactor scheve golfaanval LI
S.3 Golfoverslaghoogte LI

T Berekening golfoploop en golfoverslag (PC-Overslag) LIII

T.1 Ingevoerde parameters LIII
T.2 Resultaten PC-Overslag LIII

U Berekening laagdikte en stroomsnelheid LIV

U.1 Parameters LIV
U.2 Buitentalud LV
U.3 Kruin LV
U.4 Binnentalud LVII

V Stabiliteit losgestorte bekleding bij stroming LX

V.1 Parameters LX
V.2 Resultaten LX

W Tekeningen integraal ontwerp LXI

Lijst van figuren

Figuur 1.1 Indeling van het rapport 2
Figuur 2.1 Indeling hoofdstuk 2 4
Figuur 2.2 Principeprofiel zee-/rivierdijk exclusief bijzondere elementen (TAW, 2001) 5
Figuur 2.3 Faalmechanismen grondconstructies (TAW, 1998) 9
Figuur 2.4 Faalmechanismen kunstwerken (Rijkswaterstaat, 2005) 11
Figuur 2.5 Gemiddeld dwarsprofiel van de Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2005) 14
Figuur 2.6 Totstandkoming oordeel b-keringen met achterlandstudie (Waterstaat, 2006) 15
Figuur 3.1 Indeling hoofdstuk 3 19
Figuur 3.2 Oplossingsrichtingen variant 1 20
Figuur 3.3 Algemene doorsnede van een dijkverhoging met een betonmuur (Muralt, 1931) 21
Figuur 3.4 Parapet op keermuur langs boulevard (TAW, 1999) 21
Figuur 3.5 Kistdam i.p.v. verflauwen taluds en amoveren woningen (TAW, 2004) 21
Figuur 3.6 Diepwand i.p.v. verflauwen taluds en amoveren woningen (TAW, 2004) 21
Figuur 3.7 Dijk over oude dijk (TAW, 2001) 21
Figuur 3.8 Buitenwaartse dijkverzwaring (TAW, 2001) 22
Figuur 3.9 Binnenwaartse dijkverzwaring (TAW, 2001) 22
Figuur 3.10 Oplossingsrichtingen variant 2 23
Figuur 3.11 Gemiddeld dwarsprofiel Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2006) 25
Figuur 3.12 Overslagbestendige dijk 27
Figuur 3.13 Muur 28
Figuur 3.14 Damwand of diepwand 29
Figuur 3.15 Dijkverbetering buitenwaarts 31
Figuur 3.16 Dijkverbetering binnenwaarts 33
Figuur 3.17 Nieuwe waterkering buitenzijde 34
Figuur 3.18 Kunstmatig rif 34
Figuur 3.19 Nieuwe waterkering binnenzijde 36
Figuur 4.1 Indeling appendix H 39
Figuur 5.1 Indeling hoofdstuk 5 41
Figuur 5.2 Laagopbouw zonnepaneel (Eco-energy, 2008) 42
Figuur 5.3 Voorbeeld bevestigingsconstructie zonnepanelen 43
Figuur 5.4 Reflectie van zonlicht via zonnepanelen (links: de maximale helling; rechts: de huidige helling) 46
Figuur 6.1 Indeling hoofdstuk 6 47
Figuur 6.2 Dwarsprofiel van de Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2006) 47
Figuur 7.1 Indeling hoofdstuk 7 56
Figuur 7.2 Stroming over een dijk bij een lage binnenwaterstand (Akkerman, 1998) 60
Figuur 7.3 Testresultaten voor gezette blokken op een filterlaag (Schiereck, 2000) 71
Figuur 7.4 Grafiek voor het ontwerpen van een waterbouwasfaltbeton bekleding op golfklappen 73
Figuur 8.1 Indeling hoofdstuk 7 74
Figuur 8.2 Te onderzoeken locaties (aangegeven met pijlen) voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam 75
Figuur 8.3 Schematische weergave van de belastingzones op het buitentalud (Waterstaat, 2007) 75
Figuur 8.4 Voorbeeld van een palenfundering 78
Figuur 8.5 Voorbeeld van dijkbekleding als fundering 79
Figuur 8.6 Beoordelingsschema aanpak toetsing voor een ontwerp 81
Figuur 8.7 Gestandaardiseerd dwarsprofiel 82
Figuur 8.8 Zonnepanelen op buitentalud (onbelaste zone) 84
Figuur 8.9 Laagopbouw buitentalud 85
Figuur 8.10 Plaatbekleding buitentalud 86
Figuur 8.11 Integraal ontwerp zonnepanelen buitentalud 87
Figuur 8.12 Zonnepanelen op binnentalud 88
Figuur 8.13 Laagopbouw binnentalud 89
Figuur 8.14 Detail van stroming over en tussen zonnepanelen 90
Figuur 8.15 Krachten op fundering en zonnepaneel 92
Figuur 8.16 Plaatbekleding binnentalud 94
Figuur 8.17 Integraal ontwerp zonnepanelen binnentalud 95
Figuur 9.1 Indeling hoofdstuk 9 97
Figuur A.1 Dwarsprofiel van de Afsluitdijk tussen Wieringen en Friesland (Stuvel, 1957) II
Figuur B.1 Overzichtskaart Afsluitdijk (bron: HR2006) III
Figuur C.1 Kaart met waterdiepten (ten opzichte van gemiddeld laag laagwaterspring (GLLWS)) (Chartworx) IV
Figuur C.2 Getijniveaus in relatie tot kaartdiepte V

Figuur C.3 Kaart met waterdiepten ter plaatse van de knik van de Afsluitdijk (ten opzichte van gemiddeld laag laagwaterspring (GLLWS)) (Chartworx) V
Figuur D.1 Overzicht van de Afsluitdijk met het bijbehorende veiligheidsoordeel (bron:LRT2006 deel 2) VII
Figuur E.1 Beoordeling van eenvoudig naar geavanceerd per beoordelingsschema (Waterstaat, 2007) X
Figuur G.1 Faalmechanisme toplaaginstabiliteit XXVI
Figuur G.2 Faalmechanisme toplaaginstabiliteit door golfklap XXVI
Figuur G.3 Diepe kleinschalige afschuiving XXVII
Figuur G.4 Uitspoeling van materiaal uit de onderlaag XXVII
Figuur G.5 Schadeverloop bij faalmechanisme materiaaltransport vanuit de ondergrond XXVII
Figuur G.6 Schadeverloop bij faalmechanisme materiaaltransport vanuit de granulaire laag XXVII
Figuur H.1 Detail van kruin van gemiddeld dwarsprofiel Afsluitdijk bij aanpassing bron: bekleding binnentalud XXIX
Figuur H.2 Detail van teen van binnentalud van gemiddeld dwarsprofiel Afsluitdijk bij aanpassing bron: bekleding binnentalud XXIX
Figuur I.1 Waterkrachtcentrale (Centraal) 11
Figuur I.2 Artist impression van stromingsturbines in de spuikokers van de Afsluitdijk (RWS, 2006) 13
Figuur I.3 Artist impression van stromingsturbines in de spuikokers van de Afsluitdijk (Technology) 13
Figuur I.4 Energie uit golfoverslag ter plaatse van de kust (Altran Technologies Netherlands BV, 2004) 20
Figuur I.5 Energie uit golfoverslag voor de kust (Wave Dragon Aps, 2007) 20
Figuur I.6 Golfdemper (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007) 21
Figuur I.7 Puntbron (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007) 21
Figuur I.8 Oscillerende golfbeweging (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007) 21
Figuur I.9 Oscillerende waterkolom 22
Figuur I.10 Drukgradiënt onder water (Altran Technologies Netherlands BV, 2004) 22
Figuur I.11 Het PRO-proces vereenvoudigd in een diagram weergegeven (Statkraft, 2007) 25
Figuur I.12 Emigratie van zoutionen door de speciale membranen zorgt voor elektrische stroom in de centrale (Redstack, 2007) 26
Figuur I.13 Artist impression van een PRO-centrale op zeeniveau (Statkraft, 2007) 26
Figuur I.14 Artist impression osmosecentrale bij de Afsluitdijk (RWS, 2006) 27
Figuur I.15 Principe van een OTEC-centrale (gesloten systeem) 29
Figuur I.16 Schematische weergave van magnetohydrodynamica (Neptune Systems) (Altran Technologies Netherlands BV, 2004) 29
Figuur I.17 Werking zonnecel (silicium) (Solar Access, 2007) 30
Figuur I.18 Instralingsdiagram (Olino, 2007) 31
Figuur I.19 Locatie en aantal windturbines nabij de Afsluitdijk (Wind Service Holland, 2007b) 35
Figuur I.20 Principe van EWICON (Balendonck, et al., 2007) 36
Figuur I.21 Stroomschema voor minimum eisen voor kans van toepassing 40
Figuur J.1 Stromingskaar Waddenzee (Sedimentatlas) XXXII
Figuur O.1 Resultaten SWAN-1D (klimaatscenario G+) XLII
Figuur O.2 Resultaten SWAN-1D (klimaatscenario W+) XLII
Figuur R.1 Bijdragen aanleghoogte kruin (TAW, 1999) XLVI
Figuur S.1 Bepaling van de representatieve taludhelling bij een talud samengesteld uit verschillende taludhellingen, exclusief een eventuele berminvloed (TAW, 2002) XLIX
Figuur S.2 Bepaling van de verandering in taludhelling bij een berm (TAW, 2002) L
Figuur U.1 Definitie parameters BOSMAN LIV
Figuur U.2 Laagdikte en stroomsnelheden op het buitentalud LV
Figuur U.3 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag op de kruin LV
Figuur U.4 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario G+) LVI
Figuur U.5 Stroomsnelheid afgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario G+) LVI
Figuur U.6 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario W+) LVII
Figuur U.7 Stroomsnelheid afgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario W+) LVII
Figuur U.8 Laagdikte en stroomsnelheden op het binnentalud LVII
Figuur U.9 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario G+) LVIII
Figuur U.10 Stroomsnelheid uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario G+) LVIII
Figuur U.11 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario W+) LIX
Figuur U.12 Stroomsnelheid uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario W+) LIX

Lijst van tabellen

Tabel 2.1 Functies en kenmerkend voorkomen van dijken/dammen (TAW, 1999) 5
Tabel 2.2 Invloed elementen op faalmechanismen (TAW, 2001) 11
Tabel 2.3 Toetscriteria met een score 'onvoldoende' (Waterstaat, 2006) 15
Tabel 3.1 Overzicht conclusie verbeteringsmaatregelen 38
Tabel 6.1 Overzicht hydraulische randvoorwaarden 51
Tabel 8.1 Vergelijking bekledingsmaterialen voor toepassing binnentalud 80
Tabel 8.2 Invloed integrale ontwerp op toetspunten 83
Tabel 8.3 Resultaten PC-Overslag 83
Tabel 8.4 Overzicht bijdragen en minimale kruinhoogte bij vastgesteld klimaatscenario en overslagdebiet 84
Tabel 8.5 Bepalen hoogte onbelaste zone 85
Tabel 8.6 Kosten integrale oplossing zonnepanelen buitentalud 88
Tabel 8.7 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag op het binnentalud (s = 3,00 m) 90
Tabel 8.8 Laagdikte en stroomsnelheden op binnentalud volgens Bosman (s = 3,00 m) 91
Tabel 8.9 Rekenwaarden laagdikte en stroomsnelheid 91
Tabel 8.10 Berekening nominale diameter losgestorte steen 91
Tabel 8.11 Eigen gewicht constructie 92
Tabel 8.12 Overslagvolume 93
Tabel 8.13 Kosten integrale oplossing zonnepanelen binnentalud 96
Tabel C.1 Omrekening kaartdiepte naar bodemdiepte VI
Tabel D.1 Toetsresultaten dijken en dammen Afsluitdijk VIII
Tabel D.2 Toetsresultaten kunstwerken Afsluitdijk VIII
Tabel F.1 Ingevoerde waarden en resultaten PC-Overslag XII
Tabel F.2 Kruinhoogtemarge XIII
Tabel F.3 Gedetailleerde toets erosie door golfoverslag XIV
Tabel F.4 Gedetailleerde toets op afschuiven van het binnentalud XV
Tabel F.5 Eindscore hoogte XVI
Tabel F.6 Toetsing kwelweglengte volgens methode Bligh XVII
Tabel F.7 Toetsing volgens methode Sellmeijer XVIII
Tabel F.8 Resultaten eenvoudige toets macrostabiliteit binnenwaarts XIX
Tabel F.9 Resultaten gedetailleerde toets macrostabiliteit binnenwaarts XIX
Tabel F.10 Resultaten eenvoudige toets macrostabiliteit buitenwaarts XX
Tabel F.11 Resultaten gedetailleerd toets macrostabiliteit buitenwaarts XX
Tabel F.12 Eindscore steenbekleding primaire waterkering XXII
Tabel F.13 Eindscore stabiliteit XXIII
Tabel G.1 Overzicht bekledingssystemen en dimensioneringsaandachtspunten (TAW, 1999) XXIV
Tabel H.1 Onderzoeksresultaten steenzettingen op een kruin XXVIII
Tabel I.1 Berekening binnenlands gebruik (CBS) 4
Tabel I.2 Verbruikers 5
Tabel I.3 Multicriteria analyse voor de verschillende methoden van duurzame energieconversie 41
Tabel I.4 Schema energieconversie 44
Tabel I.5 Huidige gasgestookte energiecentrales in Nederland 46
Tabel I.6 Huidige kolengestookte (inclusief biomassa) en kernenergiecentrales in Nederland (vervolg van Tabel I.5) 47
Tabel I.7 Overzicht geplande gas- en kolenenergiecentrales Nederland 48
Tabel I.8 Overzicht huidige waterkrachtcentrales in Nederland 49
Tabel I.9 Overzicht huidige zonnestroomprojecten in Nederland 50
Tabel I.10 Overzicht huidige windenergiecentrales in Nederland (per provincie) 52
Tabel I.11 Overzicht geplande windenergiecentrales in Nederland (per provincie) 53
Tabel I.12 Overzicht huidige energiebronnen in Nederland 54
Tabel I.13 Overzicht potentieel aan energie voor de Afsluitdijk 55
Tabel K.1 Dwarsprofiel Afsluitdijk XXXIII
Tabel K.2 Geometrische gegevens Afsluitdijk XXXIV
Tabel L.1 Positionering Afsluitdijk (Google Earth) XXXV
Tabel L.2 Verschil in positie XXXV
Tabel L.3 Lengte en hoeken XXXVI
Tabel M.1 Beschrijving bodemtypen Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2005) XXXVII
Tabel M.2 Materiaalfactoren (Rijkswaterstaat, 2005) XXXVII
Tabel M.3 Aangenomen grondparameters dijklichaam Afsluitdijk XXXVIII
Tabel N.1 Getijdengegevens Waddenzee XXXIX
Tabel N.2 Waterstanden IJsselmeer XXXIX
Tabel O.1 Ingevoerde bodemprofiel XL

Tabel O.2 Ingevoerde parameters XL
Tabel O.3 Resultaten voor klimaatscenario G+ en W+ XLII
Tabel P.1 Sneeuwbelasting XLIII
Tabel P.2 Windbelasting XLIV
Tabel Q.1 Uitzettingscoëfficiënten voor enkele stoffen XLV
Tabel R.1 Overzicht bijdragen en minimale kruinhoogte bij vastgesteld klimaatscenario en overslagdebiet XLVIII
Tabel T.1 Ingevoerde parameters LIII
Tabel T.2 Resultaten PC-Overslag LIII
Tabel U.1 Algemene parameters berekeningen laagdikte en stroomsnelheid LIV
Tabel U.2 Parameters berekeningen Schüttrumpf LIV
Tabel U.3 Parameters berekeningen Van Gent LV
Tabel U.4 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag aan de zeezijde van de kruin (buitenkruinlijn) LV
Tabel U.5 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag aan de landzijde van de kruin (binnenkruinlijn) LVI
Tabel U.6 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag op het binnentalud (s = 3,00 m) LVIII
Tabel V.1 Parameters berekeningen stabiliteit losgestorte bekleding onder zonnepanelen LX
Tabel V.2 Berekening nominale diameter losgestorte steen LX

Lijst van symbolen

Latijnse symbolen

A_e	=	schadeoppervlak	[m^2]
B_c	=	kruinbreedte	[m]
c_n	=	parameter volgens Van Gent	[-]
$c'_{h,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c''_{h,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c'_{u,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c''_{u,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c'_{V,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
C	=	Chezy coëfficiënt	[$m^{1/2}$/s]
d	=	laagdikte van de bekleding	[m]
d_{n50}	=	nominale diameter	[m]
f	=	weerstandscoëfficiënt	[-]
f_L	=	invloedsfactor door weerstand op het binnentalud	[-]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s^2]
h_0	=	laagdikte aan landzijde van de kruin	[m]
$h_{2\%}$	=	maximum laagdikte overschreden door 2% van de inkomende golven	[m]
h_{is}	=	laagdikte op het binnentalud	[m]
h_{kr}	=	kruinhoogte	[m+NAP]
$h_{mhw;xxxx}$	=	maatgevende hoogwaterstand (MHW) voor het jaar xxxx	[m+NAP]
h_{hws}	=	hoogwaterstijging (inclusief NAP-daling) over de ontwerpperiode	[m]
h_t	=	toeslagen voor bui-oscillaties, buistoten of seiches en lokale opwaaiing	[m]
h_{ovs}	=	de golfoploophoogte of een golfoverslaghoogte	[m]
h_{bd}	=	lokaal verwachte bodemdaling over de ontwerpperiode	[m]
h_{zkl}	=	verwachte kruindaling door klink en zetting van de ondergrond over de ontwerpperiode	[m]
h_k	=	vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn	[m]
H_{m0}	=	spectrale golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
k_r	=	(equivalente) ruwheid van de bodem	[m]
M_{50}	=	50%-waarde van de massaverdeling	[kg]
N	=	aantal golven	[-]
P	=	doorlatendheidscoëfficiënt	[-]

q	=	gemiddeld golfoverslagdebiet per meter	[$m^3/s/m$]
R	=	hydraulische straal	[m]
R_c	=	vrije kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn	[m]
s	=	afstand langs raai	[m]
s	=	positie op het binnentalud	[m]
$s_{m-1,0}$	=	golfsteilheid	[-]
S	=	schadefactor	[-]
t_s	=	stormduur	[s]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode	[s]
T_p	=	piekperiode in het golfspectrum	[s]
u_0	=	stroomsnelheid aan de landzijde van de kruin	[m/s]
$u_{2\%}$	=	maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven	[m/s]
u_{is}	=	stroomsnelheid op het binnentalud	[m/s]
$\overline{u_c}$	=	kritische snelheid gemiddeld over de ruimte	[m/s]
$V_{2\%}$	=	overslagvolume overschreden door 2% van de inkomende golven	[$m^3/s/m$]
x_c	=	x-coördinaat op de kruin	[m]
$z_{2\%}$	=	2%-golfoploopniveau boven de stilwaterlijn	[m]

Griekse symbolen

α	=	helling van zonnepanelen	[°]
α	=	hoek van het buitentalud	[-]
β	=	hoek van binnentalud	[°]
Δ	=	relatieve dichtheid	[-]
ϕ	=	natuurlijke hellingshoek	[-]
φ	=	hoek van zonnepanelen	[°]
γ_c	=	invloedsfactor voor weerstand op de kruin	[-]
γ_b	=	invloedsfactor voor een berm	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor ruwheid op het talud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor scheve golfaanval	[-]
γ_b	=	invloedsfactor voor invloed van een berm op het talud	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor invloed van ruwheid op het talud	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor de ruwheid op het buitentalud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor invloed van hoek van golfaanval op het talud	[-]
γ_v	=	invloedsfactor voor invloed van een verticale wand op het talud	[-]
η	=	hoek van zonnepanelen	[°]
ν	=	hoek van zonnepanelen	[°]
ρ	=	dichtheid	[kg/m^3]
ρ_s	=	dichtheid van het sediment	[kg/m^3]
ρ_w	=	dichtheid van water	[kg/m^3]
ξ_0	=	brekerparameter	[-]
ψ_c	=	Shields-parameter	[-]
Λ	=	leklengte	[m]
ξ_p	=	brekerparameter gerelateerd aan de piekgolfperiode	[-]

Afkortingen

GLLWS	=	Gemiddeld Laag LaagWater Spring
MHW	=	Maatgevend HoogWaterstand
MSL	=	Mean Sea Level
SWL	=	Still Water Level

1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de aanleiding voor dit onderzoek beschreven, waaruit de probleemanalyse en de doelstelling volgen. Vervolgens zal worden toegelicht welke werkwijze is gehanteerd en tot slot wordt de opbouw van het rapport behandeld.

1.1 Aanleiding

De Afsluitdijk, de dijk in het noordelijke deel van Nederland die de provincies Friesland en Noord-Holland met elkaar verbindt, voldoet niet meer aan de wettelijke normen voor de veiligheid van waterkeringen. Er zijn tekortkomingen met betrekking tot de hoogte van de dijk en de waterkerende hoogte, stabiliteit en betrouwbaarheid van de waterkerende kunstwerken. Deze tekortkomingen zijn het gevolg van een stijgende zeewaterspiegel, een hogere belasting ten gevolge van golven, grotere rivierafvoeren en daling van het (achter-)land. Om de veiligheid van de Afsluitdijk en het achterland te kunnen blijven garanderen dienen verbeteringsmaatregelen te worden genomen. Hiervoor zijn verschillende scenario's mogelijk, zoals verbeteringsmaatregelen voor het achterland, verbeteringen aan de Afsluitdijk, of het plaatsen van een nieuwe waterkering in de nabijheid van de Afsluitdijk.
Een geheel ander onderwerp is de toenemende vraag naar duurzame energie. De Afsluitdijk zou mogelijk een geschikte locatie kunnen zijn voor het omzetten van energie uit duurzame bronnen zoals de zon.
Een combinatie van beide thema's (veiligheid van waterkeringen en duurzame energie) zou de mogelijkheid kunnen bieden tot een verhoogde veiligheid van waterkering de Afsluitdijk met daarbij toepassing van duurzame energieconversie. Een vereiste is wel dat de toepassing van duurzame energieconversie de veiligheid van dijk niet mag aantasten en bij voorkeur dient te verbeteren.

1.2 Probleemanalyse

De combinatie van duurzame energieconversie met een waterkering (dijk) is weinig toegepast aangezien waterkeren en duurzame energieconversie twee verschillende thema's betreft. Er is dus onderzoek nodig om vast te stellen of en, zo ja, op welke manier duurzame energieconversie gecombineerd kan worden met een dijk. Hierbij zal bekeken moeten worden of een dijk in zijn functie van waterkeren wordt aangetast en of het toepassen van duurzame energieconversie een bijdrage kan leveren in het verhogen van de veiligheid.

1.2.1 Onderzoeksvraag

Hoe duurzame energie te introduceren op een primaire dijk en daarmee zorgen voor een gelijke of grotere mate van veiligheid voor deze dijk?

1.2.2 Doelstellingen

De doelstellingen van dit onderzoek zijn:

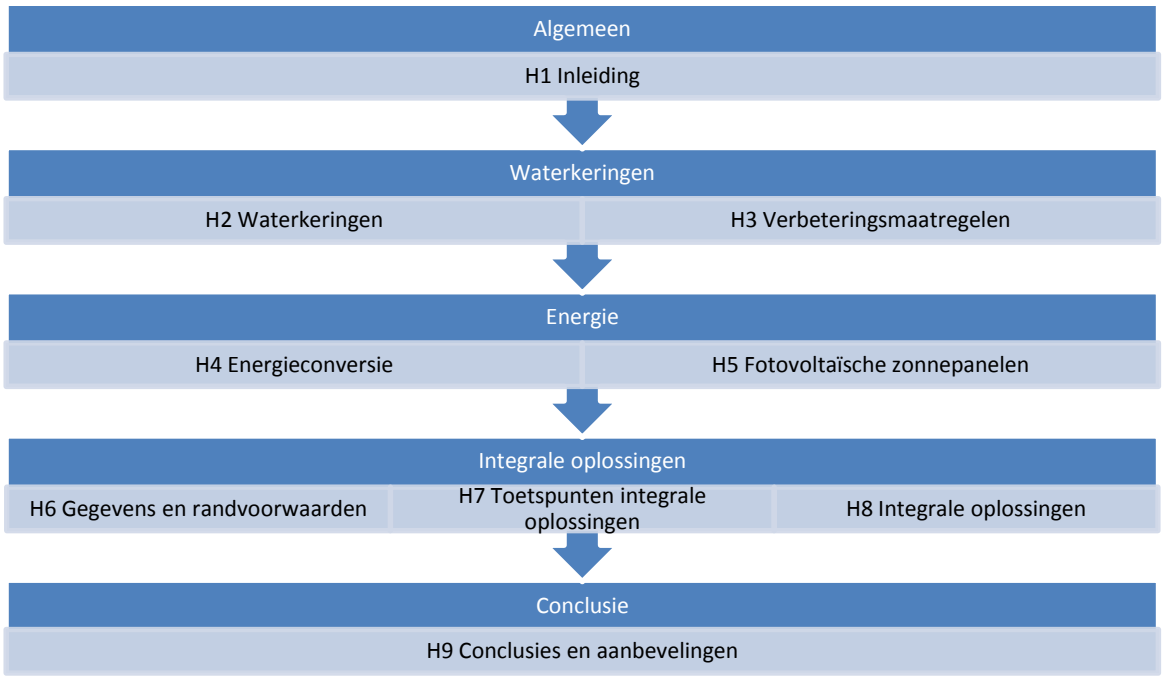
1. De mogelijkheden onderzoeken voor het realiseren van een voldoende mate van veiligheid voor de Afsluitdijk met betrekking tot de functie waterkeren;
2. Het onderzoeken van de haalbaarheid voor de toepassing van duurzame energie op een primaire dijk, met speciale aandacht voor zonne-energie;
3. Bekijken in welke mate het mogelijk is voorgenoemde punten te integreren;
4. Het maken van een integraal en innovatief ontwerp (schematisch) dat in theorie realiseerbaar is en is gebaseerd op een combinatie van de Afsluitdijk die voldoet aan de veiligheidsnormen en zonne-energie.

1.3 Werkwijze

Het onderzoek kent verschillende aspecten waarbij een gelijke of grotere mate van veiligheid van een dijk voorop staat. De toepassing van methoden van duurzame energieconversie op een waterkering neemt hierbij een ondergeschikte rol in, tenzij toepassing hiervan de een gelijk of een grotere mate van veiligheid van een dijk oplevert. Allereerst wordt bekeken welke vormen van duurzame energieconversie er zijn en of deze geschikt zijn voor toepassing met een dijk en welke gevolgen dit heeft. Hieruit volgt een vorm van duurzame energieconversie waarvoor de haalbaarheid en mogelijkheden van toepassing verder onderzocht zullen worden. De randvoorwaarden worden vervolgens vastgesteld, waarna de verbeteringsmogelijkheden voor een dijk worden beschouwd. Verder worden de mogelijkheden voor toepassing (plaatsing, aanleg, et cetera) van de betreffende vorm van duurzame energieconversie beschouwd. Hieruit volgen enkele integrale oplossingen waarvoor aangetoond zal worden dat deze voldoen aan de (wettelijke) veiligheidsnormen. Een van de integrale oplossingen zal hierna verder worden uitgewerkt.

1.4 Leeswijzer

Het onderzoeksrapport bevat negen hoofdstukken en heeft een indeling zoals in Figuur 1.1 is weergegeven.



Figuur 1.1 Indeling van het rapport

Hoofdstuk 2 heeft een inleidende functie met betrekking tot het onderwerp waterkeren en geeft het huidige systeem van waterkeringen in Nederland en de situatie omtrent de Afsluitdijk beknopt weer.

In hoofdstuk 3 worden diverse verbeteringsmaatregelen voor de veiligheid besproken. Het betreft een vergelijking van de mogelijkheden zoals het behouden van de huidige situatie, het nemen van verbeteringsmaatregelen voor het achterland, het verbeteren van een dijklichaam, maar ook het plaatsen van een nieuwe dijk.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op diverse methoden voor de conversie van duurzame energie en de mogelijkheden voor toepassing hiervan op de Afsluitdijk. Hierbij worden energie uit water, zonne-energie, windenergie en geothermische energie behandeld.

In dit hoofdstuk wordt alleen een samenvatting van dit onderzoek weergegeven; een volledige versie is te vinden in appendix I.

In hoofdstuk 5 worden de mogelijkheden voor de toepassing van zonnepanelen besproken. Er wordt bekeken welke bevestigingsmogelijkheden er zijn voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijk en welke functies deze daarbij kunnen bekleden. Verder worden bijkomstigheden zoals de reflectie van zonlicht bekeken.

In hoofdstuk 6 worden de gegevens en de randvoorwaarden weergegeven en nader toegelicht. Bijvoorbeeld geometrische gegevens van de Afsluitdijk en de hydraulische randvoorwaarden worden vastgesteld.

In hoofdstuk 7 worden de toetspunten waarop de integrale oplossingen zullen moeten voldoen worden behandeld. Het gaat hier om methoden voor het vaststellen van de kruinhoogte, de overloophoogte, de hoeveelheid golfoverslag, het bepalen van de laagdikte en stroomsnelheid van overslaand water, de stabiliteit van een dijklichaam, voorland en dijkbekleding, et cetera.

In hoofdstuk 8 staan de geïntegreerde oplossingen centraal en worden diverse (kansrijke) oplossingen gegeven voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijk. Daarbij zal worden aangetoond dat bij deze oplossingen aan de randvoorwaarden wordt voldaan. Een aantal randvoorwaarden zal met de huidige leidraden goed toetsbaar blijken te zijn, terwijl bij een aantal andere randvoorwaarden de methode van toetsen nog vastgesteld dient te worden. De oplossingen betreffen principeoplossingen. Verder worden kosten bepaald en praktische problemen behandeld.

In hoofdstuk 9 worden de conclusie van het onderzoek en aanbevelingen gegeven.

In de hoofdstukken 2 tot en met 5 zal een algemeen deel beschreven worden, waarna de Afsluitdijk als voorbeeldproject wordt gebruikt.

2 Waterkeringen



Figuur 2.1 Indeling hoofdstuk 2

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een korte uitleg gegeven over het huidige waterkeringsysteem en de opbouw van dijken in Nederland (paragraaf 2.2). Verder worden de belastingen voor een waterkering behandeld (paragraaf 2.3). Ook de faalmechanismen die kunnen optreden bij waterkeringen behandeld (paragraaf 2.4). De vijfjaarlijkse toetsing van waterkeringen in Nederland komt aan de orde (paragraaf 2.5). Er zal nader worden ingegaan op de Afsluitdijk waarbij zal worden gekeken naar de geschiedenis van deze verbindende waterkering en naar de vijfjaarlijkse toetsing van 2006 (paragraaf 2.6). En tot slot zal dit hoofdstuk worden afgesloten met een conclusie (paragraaf 2.7).

2.2 Waterkeringen in Nederland

2.2.1 Algemeen

In Nederland is een verscheidenheid aan waterkeringen aanwezig, welke het achterliggende land beschermen tegen overstroming. Waterkeringen zijn nodig aangezien veel mensen in een deel van Nederland leven dat onder de waterspiegel van rivieren, meren en zeeën ligt. Waterkeringen functioneren niet alleen als constructie waarmee water wordt tegengehouden, maar kunnen tevens functioneren als verkeersverbinding, woongebied, constructie tegen verzilting en het behouden van zoetwater voor veeteelt en landbouw. Verder kan een waterkering de mogelijkheid bieden voor het lozen en inlaten van water en de doorvaart van de scheepvaart.
Ter verzekering van de beveiliging door waterkeringen tegen overstromingen door het buitenwater is sinds 1995 de Wet op de waterkering van kracht. Hierin staan de wettelijke regels met betrekking tot de aanleg, verbetering en het onderhoud van waterkeringen en geeft alle dijkringgebieden een veiligheidsnorm.

2.2.2 Indeling van waterkeringen

Het systeem van waterkeringen in Nederland bestaat uit primaire en regionale waterkeringen. Een primaire waterkering biedt bescherming tegen overstroming doordat deze ofwel behoort tot het

stelsel dat een dijkringgebied, al dan niet met hoge gronden, omsluit, ofwel vóór een dijkringgebied is gelegen. Een regionale waterkering is een niet-primaire waterkering die overwegend bescherming biedt tegen overstroming vanuit het binnenwater.
Primaire en regionale waterkeringen bestaan uit natuurlijke en kunstmatige waterkeringen, waarbij vier (hoofd)typen constructies zijn te onderscheiden:

1. duinen;
2. grondconstructies (dijken, dammen);
3. bijzondere waterkerende constructies (onder andere kistdammen, keermuren, damwanden);
4. waterkerende kunstwerken (onder andere sluizen, coupures, stormvloedkeringen, gemalen).

Hierbij kan voor grondconstructies (dijken, dammen) onderscheid worden gemaakt in verschillende type waterkeringen. Zie voor een onderverdeling binnen het type grondconstructies Tabel 2.1. Hierbij zijn tevens de meest kenmerkende eigenschappen weergegeven.

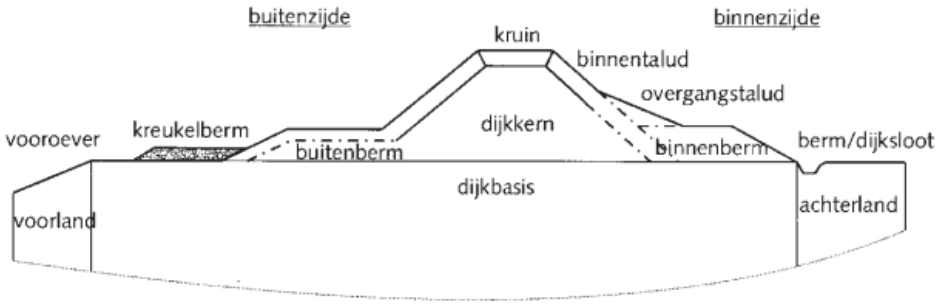
Tabel 2.1 Functies en kenmerkend voorkomen van dijken/dammen (TAW, 1999)

type waterkering	belangrijkste functie	kenmerkend voorkomen	medegebruik
zee- en meerdijken	beveiliging polderland op de scheiding van water en land	tracé van 'bestaande' waterkering; steenachtig + groen	uitloop of scheiding van bestaande functies van voor- en achterland
afsluitdammen	verkorting kustlijn	tracé op kortste verbinding; steenachtig	verbindingsroute (verkeer); i.v.m. beschikbare ruimte nieuwe functies beperkt mogelijk
compartimenteringsdammen	opdeling binnenwater (meren en Oosterschelde)	tracé op kortste verbinding; steenachtig	verbindingsroute (verkeer); i.v.m. beschikbare ruimte nieuwe functies beperkt mogelijk
scheidings- en compartimenteringsdijken	scheiding van twee dijkringgebieden	tracé van voormalige dijk; groene dijken	uitloop of scheiding van bestaand medegebruik ter weerszijden

Opmerking: de gegevens zijn algemeen kenmerkende gegevens. Hierop kunnen veel afwijkingen voorkomen.

2.2.3 Dijkopbouw

Om een beter beeld te krijgen van de opbouw van een dijk wordt het dwarsprofiel van een dijk nader beschouwd en wel specifiek de opbouw van grondconstructies (zie Figuur 2.2). Er wordt hierbij onderscheid gemaakt op basis van gelaagdheid/opbouw en afmetingen/hellingen. De elementen zijn zowel in rivier- als zeedijken terug te vinden. Er dient wel rekening gehouden te worden met de verschillen tussen zee- en rivierdijken, welke zijn te vinden in de belastingsduur van een belasting op de dijk. Een rivierdijk wordt relatief lang aan een hoge waterstand blootgesteld, waardoor de aandacht zich voornamelijk richt op binnendijks gelegen elementen. Een zeedijk wordt relatief kort belast met een hoge waterstand, maar met golfaanval, waardoor de aandacht voornamelijk uit gaat naar het buitentalud, de kruinhoogte en de bekleding. Een meerdijk heeft een vergelijkbaar dwarsprofiel met dat van een zeedijk, echter varieert de normale waterstand weinig en ligt de kreukelberm op dit niveau.



Figuur 2.2 Principeprofiel zee-/rivierdijk exclusief bijzondere elementen (TAW, 2001)

Hieronder zijn de verschillende elementen en de bijbehorende waterkerende functies (ingedeeld naar elementengroep) behandeld. Er zullen hierbij faalmechanismen genoemd worden, waarvan de betekenis is gegeven in paragraaf 2.4.

Ondergrond

De ondergrond is de bestaande bodem die een dijk moet dragen en dient in staat te zijn om de plaatsvastheid en vormvastheid van de grondconstructie te garanderen en tegelijkertijd in staat zijn zelf het water te keren. Voor de ondergrond kan onderscheid worden gemaakt in onderstaande elementen:

- Dijkbasis
  De dijkbasis is de zich binnen de invloedssfeer van de dijk bevindende ondergrond en vormt het fundament van de waterkerende grondconstructie. Een belangrijke rol spelen de sterkte- en vervormingseigenschappen zoals zetting, de macrostabiliteit van de dijkkern, de taluds en de bermen en erosie en/of stabiliteitsverlies door piping en of opdrijven of opbarsten van een afdekkende laag van het achterland.
- Vooroever/voorland
  De vooroever is de (ondiepe) waterbodem in de zone vlak voor de teen van de dijk, indien sprake is van een ondiepe waterbodem wordt van een voorland gesproken. Het voorland heeft invloed op de golfoploop en golfoverslag, waarmee bij het bepalen van de kruinhoogte rekening wordt gehouden. Verder vervult het voorland een functie bij de buitenwaartse stabiliteit en dient rekening gehouden te worden met zettingsvloeiing en zandmeevoerende wellen (piping).
- Achterland
  Het achterland is het aan de dijk grenzende binnendijks gelegen land. Dit land kan een bijdrage leveren aan de stabiliteit van het dijklichaam en heeft invloed op het opdrukken of opbarsten van slecht doorlatende klei- en veenlagen en piping.

Constructieve elementen

De constructieve elementen leveren het waterkerend vermogen van een dijk. Dit wordt primair bepaald door de kruin. Het hoofddoel van deze elementen is dan ook het op de juiste hoogte en het op zijn plaats houden van de kruin. Er kan hierbij onderscheid worden gemaakt in onderstaande elementen:

- Kruin (incl. bekleding)
  De kruin is het hoogste punt van het dijklichaam en voorkomt bij de juiste hoogteligging overlopen en een te groot overslagdebiet. Bij falen van kruin treedt niet alleen schade op door erosie aan het element zelf, maar ook aan het binnentalud, het overgangstalud en de binnenberm. De combinatie van erosie en infiltrerend water kan leiden tot afschuiven op micro- of macroschaal.
- Dijkkern
  De dijkkern is de draagconstructie waarop de verschillende elementen van het dwarsprofiel zijn opgelegd. Het gewicht van de dijkkern zorgt samen met de schuifweerstand van de ondergrond voor de sterkte tegen zijdelings wegschuiven van de dijk bij de maatgevende hoogwaterstand (MHW). Verder heeft de dijkkern invloed op de macrostabiliteit van het buiten- en binnentalud, microstabiliteit en piping.
- Buitentalud
  Het buitentalud heeft een directe relatie met de belasting door golven. Het buitentalud heeft invloed op de golfoploop (en daarmee het overslagdebiet) en de macro- en microstabiliteit zowel buiten- als binnenwaarts.
- Buitenberm
  Een buitenberm wordt vanuit de waterkerende functie toegepast bij zee- en meerdijken om de golfoverslag te verminderen. Een buitenberm beïnvloedt de golfoploop (en daarmee het overslagdebiet), de macrostabiliteit van het buitentalud, de stabiliteit van het binnentalud (door invloed op de korrel- en waterspanningen in de dijkkern en –basis) en piping.

- Lage buitenberm/ plasberm (rivierengebied)/kreukelberm (zee- of meerdijk)
  Dit is een horizontaal gedeelte van een dijk, aan de buitenzijde gelegen, als overgang tussen de harde bekleding en de rest van het talud of de vooroever. Deze berm ligt bij zeedijken even boven laagwater en bij meerdijken op het laagste meerpeil. Deze berm dient de beëindiging van een harde bekleding op het buitentalud te beschermen tegen aantasting door golven of stroming en beïnvloedt de macrostabiliteit van het buitentalud en de microstabiliteit.
- Binnentalud
  Het binnentalud is een hellend vlak van het dijklichaam aan de binnenzijde van de dijk. Bij hoge waterstanden al of niet in combinatie met golfoverslag wordt de sterkte van het binnentalud op verschillende manieren aangesproken. Het binnentalud dient bescherming te bieden tegen erosie door en infiltratie van overslaand water, hierbij dient rekening gehouden te worden met verweking en de macrostabiliteit. Verder heeft het binnentalud invloed op de sterkte tegen zijdelings wegschuiven van de dijk bij de maatgevende hoogwaterstand (MHW).
- Overgangstalud
  Een overgangstalud ofwel overgangsberm kan worden toegepast ter vergroting van de stabiliteit van het binnentalud. Een overgangstalud beïnvloedt de macro- en microstabiliteit van het binnentalud.
- Binnenberm
  Een binnenberm is een extra verbreding aan de binnenzijde van de dijk en beïnvloedt de macrostabiliteit van het binnentalud, piping en opdrijven of opbarsten van de afdekkende laag van de dijkbasis of het achterland.
- Berm-/dijksloot
  Een bermsloot heeft een gunstige invloed op de grondwaterstand en de waterspanningen in de dijk en het achterland. Een bermsloot beïnvloedt de macrostabiliteit van het binnentalud, de microstabiliteit, piping en opdrijven of opbarsten van de afdekkende laag van de dijkbasis of het achterland.

Tot slot wordt de bekleding van een dijklichaam nog beschouwd. Bekledingen kunnen op diverse wijzen een bijdrage leveren aan de verschillende functies van een dijklichaam:

- als een noodzakelijke bescherming van het onder-/achterliggende grondlichaam en/of reductie van de golfoploop met het oog op het handhaven van de uit de wettelijke veiligheidsnorm vereiste sterkte van de kering;
- ten behoeve van het beperken van onderhoud: de optredende schade moet kleiner zijn dan de uit economisch oogpunt toelaatbare schade;
- het leveren van een bijdrage aan de waterdichtheid van de kering;
- een esthetisch/natuurlijke bijdrage; gericht op de overige gebruiksfuncties van de waterkering.

Vaak is een combinatie van deze bijdragen aanwezig.
Voor de bovenlaag van een dijkbekleding kan onderscheid worden gemaakt in de volgende clusters van dijkbekledingsmaterialen:

- gras
- losgestorte materialen
- verpakte bekledingen
- gezette bekledingen en blokkenmatten
- plaatbekledingen
- asfaltbekledingen
- overige bekledingen en materialen

Meer informatie over bekledingen de toepassing ervan is te vinden in appendix G.

2.3 Belastingen

De elementen zoals genoemd in paragraaf 2.2.3 dienen het achterland te beschermen tegen overstromen door voldoende weerstand te bieden tegen de belastingen waaraan een waterkering blootgesteld kan worden. Om welk type belastingen het gaat zal hieronder besproken worden. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen belastingen voor dijklichamen en kunstwerken en bijzondere constructies.

2.3.1 Dijklichaam

Bij de belastingen voor een dijklichaam kan onderscheid worden gemaakt in:

- Permanente belastingen
  - Eigen gewicht en gronddruk
    Het eigen gewicht is van invloed op de macrostabiliteit en hangt af van het volumiek gewicht van de in het grondlichaam aanwezige materialen (zand, klei, wegverharding, et cetera) evenals de mate van verzadiging van deze materialen.
  - Onttrekkingen uit de grond
    Onttrekking van bijvoorbeeld water, olie, zout of aardgas op grote of minder grote diepte kan als belasting worden beschouwd en kan leiden tot zetting of bodemdaling.
- Veranderlijke belastingen
  - Hydraulische belastingen
    De hydraulische belastingen zijn gerelateerd aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming. Van belang zijn hierbij:
    a. waterstand;
    b. golfhoogte;
    c. golfperiode.
  - Overige veranderlijke belastingen
    De overige belastingen zijn de invloeden of processen die de stabiliteit van de kering bedreigen, anders dan hydraulische of grondmechanische belastingen. Van belang zijn hierbij:
    a. wind
    b. ijs
    c. verkeer;
    d. aardbevingen;
    e. bodemonderzoek en explosies;
    f. aanvaringen en drijvende voorwerpen;
    g. biologische aantasting
    h. chemische aantasting
    i. klimatologische aantasting;
    j. vandalisme en medegebruik.

2.3.2 Kunstwerken en bijzondere constructies

De belastingen die voor kunstwerken en bijzondere constructies van belang zijn:

- Permanente belastingen
  - Eigen gewicht constructie(onderdelen)
  - Gronddruk
  - (Grond)waterdruk (ook opdrijvende kracht)
- Veranderlijke belastingen
  - Hydraulische belastingen
    a. drukverschillen ten gevolge van waterstanden (maatgevend hoogwatersituatie, negatief verval)
    b. drukverschillen ten gevolge van windgolven (inclusief eventuele golfklappen)
    c. stroming (inclusief eventuele daardoor veroorzaakte trillingen)

d. scheepsgolven en/of translatiegolven (niet tijdens MHW)
e. scheepsstroming

- Overige veranderlijke belastingen
  a. troskrachten;
  b. verkeersbelastingen;
  c. temperatuurbelastingen;
  d. winddrukken.

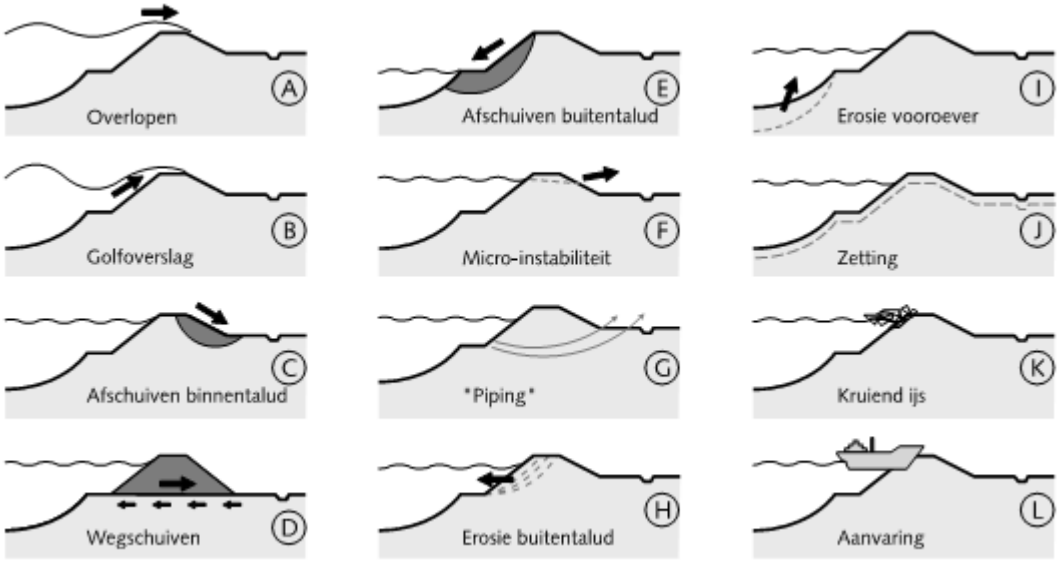
- Bijzondere belastingen
  - Aanvaringen;
  - Aardbevingen;
  - Explosies;
  - IJs;
  - Stroming in geval van niet sluiten;
  - Vandalisme en sabotage.

2.4 Faalmechanismen

In paragraaf 2.2.2 zijn verschillende type waterkeringen besproken. Hierbij kunnen verschillende faalmechanismen optreden. Onderscheid kan worden gemaakt in faalmechanismen voor duinen, grondconstructies, bijzondere constructies en kunstwerken en objecten. Deze zullen hieronder worden behandeld. Er wordt niet ingegaan op faalmechanismen voor duinen aangezien deze niet van belang worden geacht voor dit onderzoek.

2.4.1 Grondconstructies

De constructie van een waterkering kan op verschillende manieren falen en/of bezwijken. Er wordt gesproken van falen als de waterkering één of meer functies niet vervult, terwijl bij bezwijken het verlies van samenhang of grote geometrieverandering wordt bedoeld. Als een waterkering wordt aangetast in het waterkerend vermogen wordt er gesproken van een faalmechanisme. Bij faalmechanismen voor grondconstructies kan onderscheid worden gemaakt in faalmechanismen zoals weergegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Faalmechanismen grondconstructies (TAW, 1998)

De verschillende faalmechanismen voor grondconstructies worden hieronder nader beschouwd:

A. Overlopen
   Dit is het overlopen van water over de kruin van een dijk ten gevolge van een hoge waterstand gecombineerd met golfoverslag. Het gevolg is dat inundatie van een dijkringgebied plaatsvindt.
B. Golfoverslag
   Dit is het overslaan van water over de kruin van de dijk ten gevolge van een hoge waterstand gecombineerd met golfoverslag. Door golfoverslag kan erosie van het binnentalud hiervan het gevolg zijn. Bij infiltratie kan dit leiden tot afschuiven van het binnentalud.
C. Afschuiven binnentalud (macrostabiliteit buitentalud)
   Dit faalmechanisme betreft het afschuiven van het binnentalud langs een recht of gebogen glijvlak. Dit als gevolg van instabiliteit van het binnentalud waarvan de oorzaak kan liggen in infiltratie van overstromend water door een combinatie van een hoge waterstand en golfoverslag, of door een combinatie van waterdruk tegen de waterkering en verhoogde waterspanning in de ondergrond.
D. Wegschuiven
   Het wegschuiven van een grondlichaam is het faalmechanisme waarbij een waterkering geheel opzij schuift als gevolg van waterdruk tegen de waterkering gecombineerd met een verhoogde waterspanning in de ondergrond.
E. Afschuiven buitentalud (macrostabiliteit buitentalud)
   Dit faalmechanisme betreft het afschuiven van het buitentalud langs een recht of gebogen glijvlak. Dit als gevolg van instabiliteit van het buitentalud waarvan de oorzaak kan liggen in een snelle daling van de buitenwaterstand na een periode van hoogwater.
F. Micro-instabiliteit
   Micro-instabiliteit is de instabiliteit van het binnen- of buitentalud door uittredend kwelwater door het grondlichaam, maar bij lagere waterstanden dan het faalmechanisme afschuiven binnentalud. Het gevolg kan uitspoeling, afdrukken, of afschuiven van de toplaag van het binnen- of buitentalud zijn.
G. Zandmeevoerende wellen (piping)
   Dit is het uittreden van water aan de binnenzijde van een waterkering waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Dit faalmechanisme treedt vaak op bij een hoge waterstand en het gevolg is dat er holten en gangen ontstaan. De stabiliteit van de gehele dijkconstructie kan hierdoor verminderen.
H. Erosie buitentalud
   Dit faalmechanisme heeft betrekking op het stabiliteitsverlies van het buitentalud en wordt veroorzaakt door stroming of golfbeweging langs het buitentalud.
I. Erosie vooroever
   Dit faalmechanisme heeft betrekking op het stabiliteitsverlies van het voorland en wordt veroorzaakt door stroming of golfbeweging langs het buitentalud.
J. Zetting
   Zetting is het voorkomen van grootschalige vervorming van de grondconstructie. Dit zijn bijvoorbeeld plaatselijke verzakkingen of een algehele zakking van de gehele grondconstructie met als gevolg een lagere kruinhoogte.
K. Kruiend ijs
   Kruiend ijs is een faalmechanisme waarbij ijs een mechanische bedreiging voor de grondconstructie vormt. Bij dit faalmechanisme kunnen de dijkbekleding en de kruin worden aangetast door ijs.
L. Aanvaring
   Aanvaring is een faalmechanisme waarbij schepen of drijvende voorwerpen een mechanische bedreiging voor de grondconstructie vormen. Bij dit faalmechanisme kunnen de dijkbekleding en de kruin worden aangetast door schepen of drijvende voorwerpen.

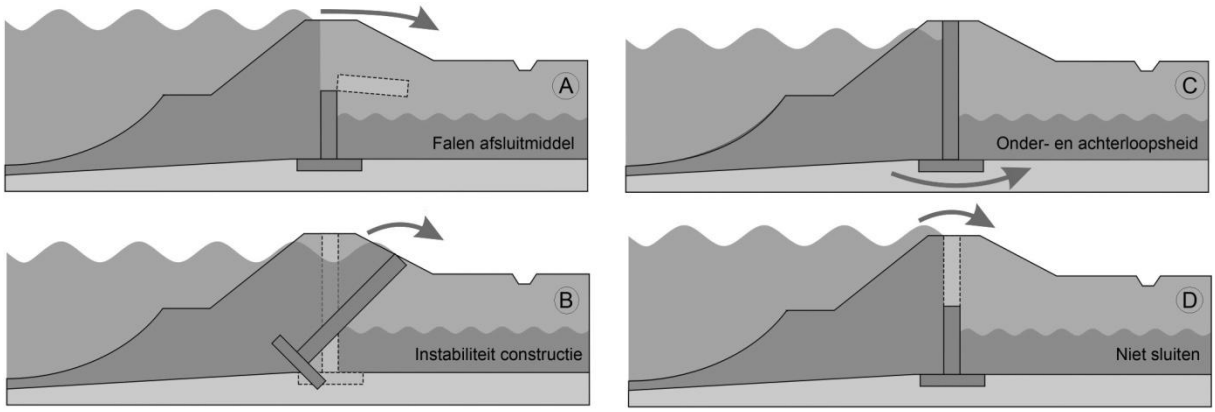
Nu de faalmechanismen voor grondconstructies bekend zijn kan de relatie tussen de elementen en deze faalmechanismen worden weergegeven. In Tabel 2.2 is de invloed van de elementen op de faalmechanismen te zien.

Tabel 2.2 Invloed elementen op faalmechanismen (TAW, 2001)

element	zetting	golf-overslag	afschuiven buitentalud	afschuiven binnentalud	zettings-vloeiing	micro-stabiliteit	piping
kruin	x	x	x	x		x	
dijkkern	x	x	x	x		x	x
buitentalud		x	x			x	x
buitenberm		x	x			x	x
lage buitenberm			x			x	
binnentalud		x		x		x	x
overgangstalud		x	x			x	x
binnenberm				x		x	x
bermsloot				x		x	x
dijkbasis	x		x	x	x	x	x
voorland		x	x		x		x
achterland				x		x	x
afsluiting watervoerende tussenzandlaag			x			x	x
scherm in kruin			x	x		x	x
drainage			x	x		x	x

2.4.2 Faalmechanismen bijzondere constructies en kunstwerken

Naast voorgenoemde faalmechanismen voor grondconstructies zijn voor bijzondere constructies en kunstwerken nog enkele faalmechanismen van belang:



Figuur 2.4 Faalmechanismen kunstwerken (Rijkswaterstaat, 2005)

A. Falen afsluitmiddel
B. Instabiliteit constructie
C. Onder- en achterloopsheid (piping en erosie)
D. Niet (tijdig) sluiten beweegbare kering

2.4.3 Faalmechanismen objecten

Verder kunnen zich nog objecten in of bij een waterkering bevinden waarop faalmechanismen van toepassing kunnen zijn. Een deel van de genoemde faalmechanismen voor kunstwerken kan optreden, maar ook andere faalmechanismen zijn mogelijk, zoals:

A. Het omwaaien en ontwortelen van bomen en struiken die door de wind, waardoor een ontgronding ontstaat die vervolgens een erosiemechanisme kan initiëren.
B. Lokaal hoge stroomsnelheden bij overstroming van een dijk of taluds door bebouwing.

C. Instabiliteit en vervormingen door belasting van wegen met verkeer.
D. Aantasting van de integriteit van de waterkering doordat constructies niet hetzelfde zettingsgedrag vertonen als de omringende grond.
E. Lekkage met erosie en explosie van pijpleidingen.

2.4.4 Faalmechanismen bekledingen

De faalmechanismen voor bekledingen zijn afhankelijk van het type bekleding en zijn weergegeven in appendix G. Verder zijn in appendix G de faalmechanismen voor steenbekledingen apart behandeld.

2.5 Toetsing waterkeringen

Volgens de Wet op de waterkering dienen de beheerders van primaire waterkeringen deze iedere vijf jaar te toetsen aan de wettelijke normen voor de veiligheid. Het doel van deze toetsing is inzicht te verkrijgen in de staat van de waterkeringen in Nederland. Dit moet leiden tot het waarborgen van de veiligheid tegen overstromingen. Uit deze toetsing kunnen drie oordelen volgen:

1. 'Voldoet', wat inhoudt dat alle secties van de waterkering de eindscores 'voldoende' en 'goed' hebben gekregen waarmee de waterkering aan de norm voldoet;
2. 'Voldoet niet', wat inhoudt dat minimaal één sectie van de waterkering de eindscore 'onvoldoende' heeft gekregen, waarmee de waterkering niet voldoet aan de norm;
3. 'Geen oordeel', wat inhoudt dat de beoordelaar onvoldoende gegevens ter beschikking heeft of onvoldoende mogelijkheden om tot een eindscore volgens de toetsingsregels te komen. Er dient dan nader onderzoek uitgevoerd te worden.

Bij de toetsing voor primaire waterkeringen wordt er, afhankelijk van ligging en functie, onderscheid gemaakt in drie categorieën waterkeringen:

1. Categorie a-keringen: dit zijn dijken, duinen en kunstwerken die direct bescherming bieden tegen buitenwater (zee, grote rivieren, het IJsselmeer of het Markermeer);
2. Categorie b-keringen: dit zijn waterkeringen die waterkeringen uit categorie a of categorie c met elkaar verbinden;
3. Categorie c-keringen: dit zijn waterkeringen die indirect tegen buitenwater beschermen.

Bij het toetsen gaan de beheerders na of de sterkte van de waterkeringen voldoet aan de wettelijk gestelde norm. Voor de sterkte van de waterkering zijn de hoogte en stabiliteit van belang. De beheerders maken bij het toetsen gebruik van de instrumenten die de minister van Verkeer en Waterstaat vaststelt, zoals de rekenregels in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV), en gegevens over waterstanden en golven.

2.6 De Afsluitdijk

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de Afsluitdijk waarbij de geschiedenis (in vogelvlucht) en enkele kenmerken van waterkering de Afsluitdijk worden behandeld.

2.6.1 Geschiedenis van de Afsluitdijk

Zie appendix A voor een beschrijving van de geschiedenis van de Afsluitdijk.

2.6.2 Waterkering de Afsluitdijk

Volgens de Wet op waterkeren behoort de Afsluitdijk tot de groep primaire waterkeringen en is een verbindende waterkering (afsluitdam). Vanuit de IJsselmeerzijde gezien is de Afsluitdijk geen primaire waterkering die voor een dijkringgebied ligt. Voor de IJsselmeerzijde van de Afsluitdijk zijn dan ook geen Hydraulische Randvoorwaarden opgesteld. De Afsluitdijk verbindt dijkringgebieden 6 (Wieringermeer in de provincie Noord-Holland) en 12 (Friesland, Groningen). Door het verbinden van de twee dijkringgebieden verkort de Afsluitdijk de kustlijn van Nederland.

De Afsluitdijk vormt een scheiding tussen zoet buitenwater (IJsselmeer) en zout buitenwater (Waddenzee). De Afsluitdijk draagt de naam dijk (scheiding tussen water en land), maar is eigenlijk een dam (scheiding tussen twee wateren). Het IJsselmeer wordt gevoed met water dat vanuit rivier de IJssel (aftakking van de Rijn) het IJsselmeer instroomt. Om het IJsselmeer op het gewenste peil te kunnen houden, wordt bij perioden van laagwater water vanuit het IJsselmeer via de uitwateringssluizen bij Den Oever en Kornwerderzand naar de Waddenzee gespuid.
De veiligheidsnorm voor de Afsluitdijk betreft een frequentie van 1/10.000. Dit betekent dat voor de Afsluitdijk een gemiddelde overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar (ofwel 1 keer per 10.000 jaar) van de hoogste waterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren. Dit houdt niet per definitie in dat de hoogste waterstand één keer per tienduizend jaar wordt overschreden, dit kan meer of juist minder zijn.
De normfrequentie van de Afsluitdijk bedroeg eerst 1/1.430 per jaar en is bijgesteld naar 1/10.000 per jaar. Dit was een politieke keuze om het veiligheidsniveau van het IJsselmeergebied gelijk te trekken aan het veiligheidsniveau van de omgeving. De gemiddelde overschrijdingskans van 1/10.000 was dan ook niet goed onderbouwd aangezien deze waarde gewoonlijk wordt gebruikt voor het laagliggende land met intensief grondgebruik (industrie, grote steden, luchthavens, et cetera). Een doorbraak van de brengt het achterliggende land niet direct in gevaar.

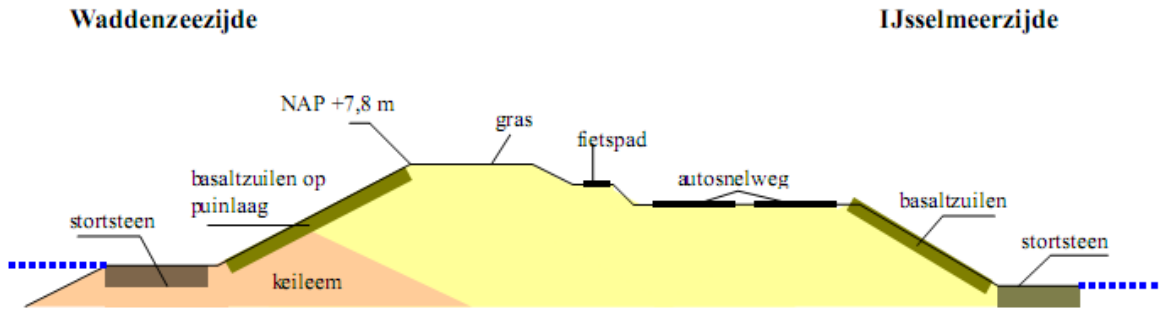
De Afsluitdijk heeft niet alleen de functie waterkeren, maar ook andere functies zijn van toepassing op de Afsluitdijk. Het totaal aan functies is:

- waterkering;
- verkeersverbinding;
- constructie tegen verzilting;
- behoud zoetwater voor veeteelt en landbouw;
- drinkwatervoorziening;
- aan- en afvoer van water, ijs en sediment;
- doorvaart van scheepvaart;
- verdediging tegen invallen ten tijde van oorlog (in het verleden).

De Afsluitdijk heeft in totaal een lengte van 31,4 km waarvan het grootste deel dijken betreft en een klein deel kunstwerken. De kunstwerken zijn twee schutsluizen- en twee spuisluizencomplexen. Verder zijn er nog lei- en havendammen aanwezig die bijdragen aan de functie waterkeren.

De Afsluitdijk is bestaat uit de materialen keileem, klei en zand die in de bodem van de vroegere Zuiderzee werden aangetroffen. De dijk is opgebouwd uit een keileemdam op rijshout, met aan de IJsselmeerzijde van deze dam een breed zandlichaam dat is afgedekt met keileem en klei. Het dijklichaam wordt onder de waterlijn beschermd door kraagstukken opgebouwd met rijshout en riet waar stortsteen op geplaatst is. Boven de waterlijn wordt de dijk beschermd door basaltblokken en aanvankelijk ook met natuursteen (later vervangen door basaltblokken). De kruin en het binnentalud zijn voorzien van een grasbekleding. Verder zijn er in het dwarsprofiel asfaltwegen (Rijksweg A7 van Amsterdam naar Groningen en fietspad), ten behoeve van het wegverkeer, aanwezig.

Het gemiddeld dwarsprofiel van de Afsluitdijk is in Figuur 2.5 weergegeven. De kruinhoogte en de afmetingen van het dwarsprofiel variëren enigszins in de lengterichting van de dijk en ter plaatse van de kunstwerken, het monument, et cetera, echter mag dit dwarsprofiel als gemiddeld worden beschouwd.



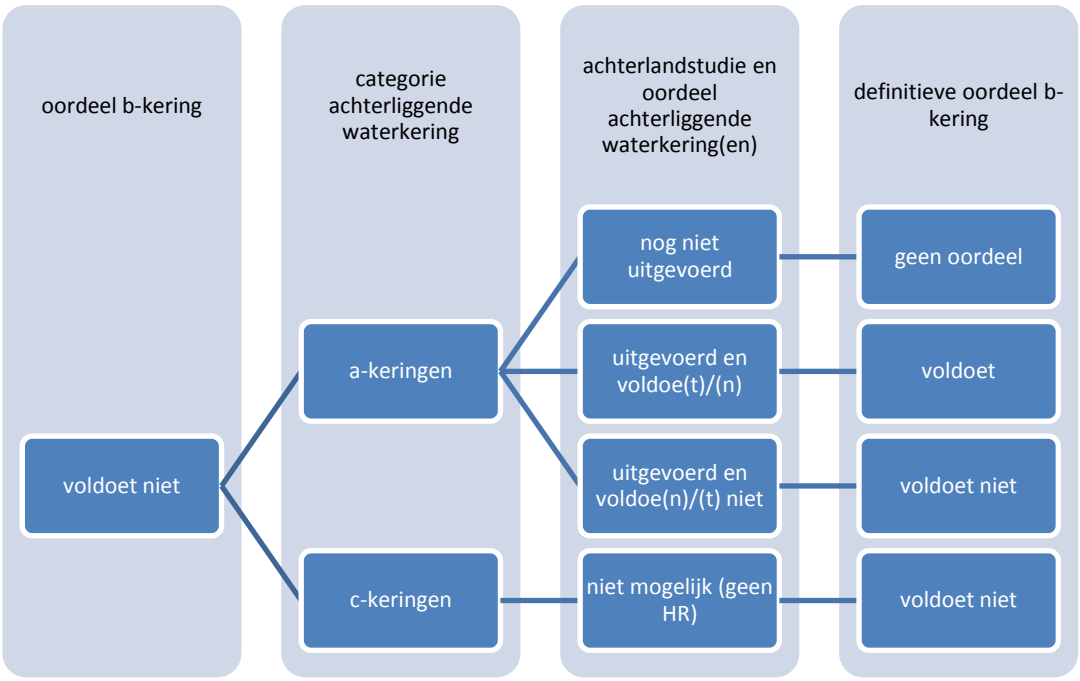
Figuur 2.5 Gemiddeld dwarsprofiel van de Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2005)

Details en gegevens worden behandeld in hoofdstuk 6 paragraaf 6.2.

2.6.3 Vijfjaarlijkse toetsing Afsluitdijk

In de periode 2001-2006 is de vijfjaarlijkse toetsing voor primaire waterkeringen voor een tweede keer uitgevoerd. Bij deze toetsing is voor de Afsluitdijk rekening gehouden met de hydraulische randvoorwaarden behorend bij een normfrequentie van 1/10.000 per jaar. Uit de toetsing volgde dat de Afsluitdijk niet aan de veiligheidsnorm voldoet. De oorzaken hiervan zullen in de volgende alinea's worden besproken.

Bij toetsing blijkt een groot deel van de getoetste secties van de Afsluitdijk de score 'onvoldoende' op te leveren. De dijk is niet hoog genoeg en de grasbekleding op de kruin en het binnentalud is onvoldoende erosiebestendig. Ook de sluizen in de Afsluitdijk voldoen niet aan de veiligheidsnorm, omdat de hoogte en stabiliteit onvoldoende zijn. Als de Afsluitdijk faalt, kan de waterstand in het IJsselmeer met enkele decimeters stijgen. Aangezien de Afsluitdijk een verbindende waterkering van categorie b is, volgde een achterlandstudie. Bij deze studie werd het oordeel van de dijken die achter de verbindende waterkering liggen betrokken. In het geval de achterliggende waterkeringen van categorie a is dient een achterlandstudie uitgevoerd te worden, waarbij het oordeel voor de voorliggende b-kering afhankelijk is van het oordeel van de achterliggende a-kering. In het geval de achterliggende waterkering van categorie c is kan geen achterlandstudie worden uitgevoerd aangezien van c-keringen (nog) geen hydraulische randvoorwaarden beschikbaar zijn. Het oordeel is dan per definitie 'voldoet niet'. In Figuur 2.6 is schematisch weergegeven hoe tot de vorming van een oordeel gekomen kan worden in geval van een score 'onvoldoende' voor een categorie b-kering.



Figuur 2.6 Totstandkoming oordeel b-keringen met achterlandstudie (Waterstaat, 2006)

Uit de achterlandstudie voor de Afsluitdijk blijkt dat het systeem van een voorliggende kering in combinatie met de achterliggende dijkringgebieden ook een onvoldoende oplevert.

Bij de toetsing wordt voor ieder toetscriterium een beoordelingsschema doorlopen. Er zijn hierbij drie beoordelingsstappen te onderscheiden:

1. Stap 1: eenvoudige beoordeling en gehanteerde ontwerpregels;
2. Stap 2: gedetailleerde beoordeling;
3. Stap 3: geavanceerde beoordeling.

Zie voor een meer gedetailleerdere beschrijving van de inhoud en het gebruik van het beoordelingsschema appendix E.

Zie voor een overzicht van de toetsresultaten en de toelichting hierop, zoals deze door de Inspectie van Verkeer en Waterstaat zijn opgesteld, appendix D. In de volgende paragraaf zullen de toetsresultaten worden geanalyseerd.

2.6.4 Analyse toetsresultaten Afsluitdijk

De analyse van de toetsresultaten (in deze paragraaf) heeft alleen betrekking op de dijken en dammen behorend bij de Afsluitdijk. Kunstwerken zullen buiten beschouwing worden gelaten. In deze paragraaf worden de toetsresultaten geanalyseerd. Voor de duidelijkheid zijn in Tabel 2.3 de toetscriteria voor dijken en dammen die niet voldoen aan de norm weergegeven.

Tabel 2.3 Toetscriteria met een score 'onvoldoende' (Waterstaat, 2006)

toetscriterium	lengte	voldoet aan de norm		voldoet niet aan de norm	geen oordeel
		goed	voldoende	onvoldoende	
	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)
hoogte	29,8	1,1		28,7	
stabiliteit					
bekleding					
steenzetting	32,2	5,6		1,8	24,8
grasmat	29,9	1,7		28,2	

De conclusie van de toetsing van de dijken en dammen van de Afsluitdijk is:

- De Afsluitdijk scoort op het criterium hoogte 'onvoldoende', vanwege onvoldoende erosiebestendigheid van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud;
- De dijken voldoen aan de norm met betrekking tot de stabiliteit;
- Voor een groot deel van de steenbekleding is 'geen oordeel' gegeven, omdat voor de aanwezige bekledingstypen geen gedetailleerde toetsmethoden beschikbaar zijn.

Hieronder zullen de toetsresultaten per faalmechanisme worden besproken.

Hoogte

Bij toetsing van het criterium hoogte is allereerst gekeken naar de ontwerpnormen en randvoorwaarden. Doordat de veiligheidsnorm is verhoogd van 1/1.430 naar 1/10.000 voldoet de Afsluitdijk bij eenvoudige toetsing niet en blijkt gedetailleerde toetsing noodzakelijk. Bij de gedetailleerde toetsing wordt het overslagdebiet vastgesteld (zie appendix F) waarmee een beoordeling gegeven kan worden voor de bekleding op het binnentalud. Bij de beoordeling voor de bekleding van het binnentalud zijn de faalmechanismen erosie door golfoverslag en afschuiving bekeken.

Voor het faalmechanisme erosie door golfoverslag is de maximaal toelaatbare stroomsnelheid van overslaand water over de kruin en het binnentalud vergeleken met de optredende stroomsnelheid. Hierbij is de belastingsduur in acht genomen, waarvoor geldt dat bij een langere belastingsduur een lagere maximum stroomsnelheid van toepassing is. Het oordeel is dat voor de meeste profielen van de Afsluitdijk de optredende stroomsnelheid over het binnentalud groter is dan de maximaal toelaatbare stroomsnelheid.

Voor het faalmechanisme afschuiving is gekeken naar het mogelijk afschuiven van de binnenbekleding door verzadiging bij golfoverslag. Het oordeel is dat het merendeel van de profielen onvoldoende scoort.

Zie appendix F voor de resultaten van de toetsing op beide faalmechanismen en de eindscore per dwarsprofiel.

Het eindoordeel is dat twee van de 17 profielen de score 'goed' krijgen. De overige profielen worden beoordeeld als 'onvoldoende'. Een profiel dient geavanceerd getoetst te worden, echter verwacht de toetser niet dat dit tot een score 'goed' kan leiden.

Stabiliteit

Bij toetsing van het criterium stabiliteit is gekeken naar de faalmechanismen piping en heave, de macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts, de microstabiliteit en de stabiliteit van het voorland. Uit de resultaten van de toetsing op voorgenoemde faalmechanismen blijkt dat deze met een score 'voldoende' beoordeeld. Hieronder worden de faalmechanismen met betrekking tot de stabiliteit kort besproken. Zie appendix F voor een uitgebreidere behandeling van de toetsresultaten van de toetsing op de stabiliteit.

Piping en heave

Bij gedetailleerde toetsing op het faalmechanisme piping en heave blijken alle gemeten dwarsprofielen van de Afsluitdijk volgens de methode Sellmeijer ruimschoots te voldoen (ΔH_c (gemiddelde waarde = 16,09 m) > ΔH (gemiddelde waarde = 7,29 m)). De score voor toetsing op het faalmechanisme piping en heave is dan ook overwegend 'voldoende'.

Macrostabiliteit binnenwaarts

Bij gedetailleerde toetsing op de macrostabiliteit binnenwaarts is de stijghoogte in het zandpakket en daarmee de opwaartse waterdruk in detail bepaald en gemodelleerd in het computerprogramma MSeep. Verder is de macrostabiliteit berekend met behulp van de methode Bishop met het computerprogramma MStab. Hierbij blijkt de veiligheid tegen afglijden ('safety factor') voor alle

dwarsprofielen te voldoen. De score voor toetsing op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts is dan ook 'goed'.

Macrostabiliteit buitenwaarts

De toetsing op de macrostabiliteit buitenwaarts is vergelijkbaar met de toetsing op de macrostabiliteit binnenwaarts, echter spelen de mechanismen opdrijven en opbarsten hierbij geen rol. De gedetailleerde toetsing van de macrostabiliteit buitenwaarts is uitgevoerd aan de hand van de beoordeling op laag buitenwater en de stabiliteit van het voorland, waarbij het voorland weer op afschuiven en zettingsvloeiing wordt beoordeeld.
Bij de beoordeling op laag buitenwater is de veiligheid tegen afglijden beoordeeld en blijkt voor alle dwarsprofielen te voldoen.
Bij de beoordeling van de stabiliteit van het voorland blijken ook alle dwarsprofielen aan de eisen te voldoen (zie hiervoor paragraaf 'stabiliteit voorland').
De score voor toetsing op het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts is dan ook 'goed'.

Microstabiliteit

De toetsing van de microstabiliteit is uitgevoerd door te kijken naar de geometrie en de opbouw van de Afsluitdijk. Ook de resultaten van het computerprogramma (gebruikt bij de beoordeling van de macrostabiliteit) zijn meegenomen in de beoordeling op de microstabiliteit. Hieruit volgde een score 'voldoende' voor de microstabiliteit.

Stabiliteit bekleding

Verder is de stabiliteit van de bekleding (steenzetting en grasmat) getoetst. Bij de toetsing van de steenbekleding is onderscheid gemaakt in de toetsing van de steenbekleding van de primaire waterkering, de steenbekleding van de haven- en leidammen en de grasbekleding.

Steenbekleding primaire waterkering

Het toetsen van de steenbekleding wordt uitgevoerd met het computerprogramma Steentoets. Hierbij wordt de steenbekleding op zes faalmechanismen getoetst:

1. Toplaaginstabiliteit onder golfaanval;
2. Toplaaginstabiliteit onder langsstroming;
3. Afschuiving;
4. Materiaaltransport vanuit de ondergrond;
5. Materiaaltransport vanuit de granulaire laag.
6. Erosie van de onderlagen.

Uit de resultaten van de toetsing van de steenbekleding van de primaire waterkering blijkt dat 155 van de 176 vakken de score 'goed' krijgen. Voor de overige profielen is geavanceerde toetsing noodzakelijk.

Grasbekleding

De toetsing van de grasbekleding (op erosie door golfoverslag en afschuiving) is al meegenomen in de toetsing van de hoogte.

Zie appendix F voor een nadere toelichting op de toetsresultaten van de toetsing van de steen- en grasbekleding.

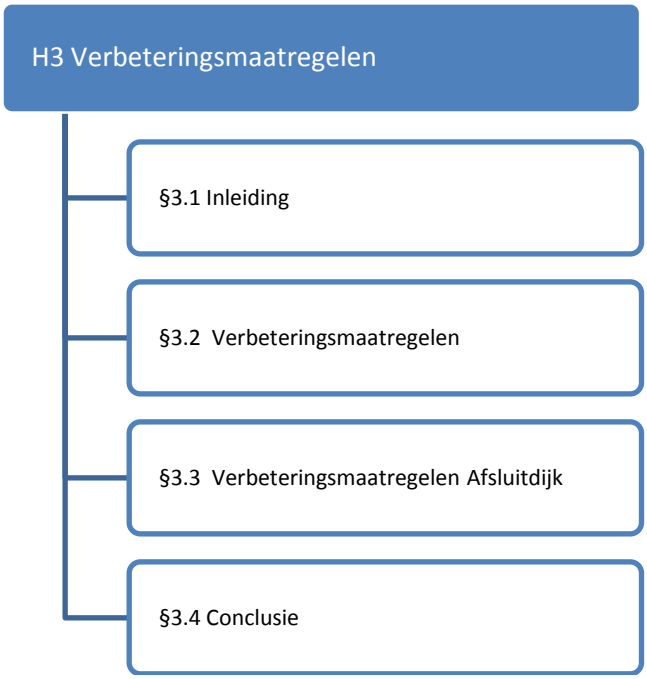
Stabiliteit voorland

Gezien de geometrie van het voorland met een gemiddelde taludhelling van minder dan 1:50 tot 100 m uit de teen van de dijk, wordt geconcludeerd dat de stabiliteit van het voorland voldoende is.

2.7 Conclusie

De Afsluitdijk voldoet niet aan wettelijke veiligheidsnormen, echter is de huidige status met betrekking tot de veiligheid van de Afsluitdijk niet dusdanig slecht zoals soms wordt voorgedaan. Onder maatgevende omstandigheden blijkt de kruinhoogte van de Afsluitdijk voldoende te zijn om overlopen te voorkomen, echter kan daarbij wel een overslagdebiet optreden waarbij de grasbekleding op de kruin en het binnentalud onvoldoende erosiebestendig zijn. Door bijvoorbeeld de hydraulische randvoorwaarden te reduceren (bijvoorbeeld door middel van een golfbreker), een (geringe) verhoging van de kruin te bewerkstelligen, of de Afsluitdijk overslagbestendig te maken kan de Afsluitdijk weer aan de veiligheidsnormen voldoen.
Verder wordt, afgezien van de steen- en grasbekleding, voldaan aan de norm met betrekking tot de stabiliteit van het dijklichaam. Een deel van de steenbekleding heeft het oordeel ‘voldoet niet’ gekregen en voor een groot deel is de beoordeling ‘geen oordeel’ gegeven, omdat voor de aanwezige bekledingstypen geen gedetailleerde toetsmethoden beschikbaar zijn.

3 Verbeteringsmaatregelen



Figuur 3.1 Indeling hoofdstuk 3

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een analyse gemaakt van de mogelijkheden tot het verhogen van de veiligheid van een waterkering. Vooraf moet vastgesteld te worden of het wel noodzakelijk is aanpassingen aan een waterkering te bewerkstelligen. Er dient bekeken te worden wat de gevolgen zijn als de huidige situatie hetzelfde blijft en hoe eventueel het achterland beschermd kan worden tegen overstroming (variant 0). Indien aanpassing noodzakelijk blijkt, zijn er verschillende oplossingsrichtingen die tot verhoging van de veiligheid van een waterkering kunnen leiden (varianten 1 en 2).

Eerst worden de mogelijkheden voor algemene situaties beschouwd (paragraaf 3.2). Er wordt een overzicht gegeven van de varianten met verschillende oplossingsmogelijkheden. Na deze beschouwing komen de situatiespecifieke oplossingen voor de Afsluitdijk aan bod waarbij meer op de details wordt ingegaan dan voor algemene situaties en er zal ook een vergelijking worden gemaakt voor de verschillende oplossingen (paragraaf 3.3). Tot slot zullen alle methoden in een gezamenlijk overzicht worden weergegeven (paragraaf 3.4).

3.2 Verbeteringsmaatregelen

Als blijkt dat een waterkering niet aan de veiligheidsnorm voldoet zijn er verschillende aanpakken mogelijk. Deze zullen hieronder als verschillende varianten worden behandeld waarbij diverse oplossingsrichtingen behoren. De varianten zijn:

1. variant 0: nulsituatie;
2. variant 1: aanpassen waterkering;
3. variant 2: plaatsen nieuwe waterkering.

3.2.1 Variant 0: nulsituatie

De nulsituatie bestaat uit het behouden van de huidige situatie waarbij geen beschermende maatregelen voor de veiligheid tegen overstromen genomen worden. Voor deze variant blijft het huidige dwarsprofiel van een waterkering hetzelfde en ook eventueel achterliggende waterkeringen

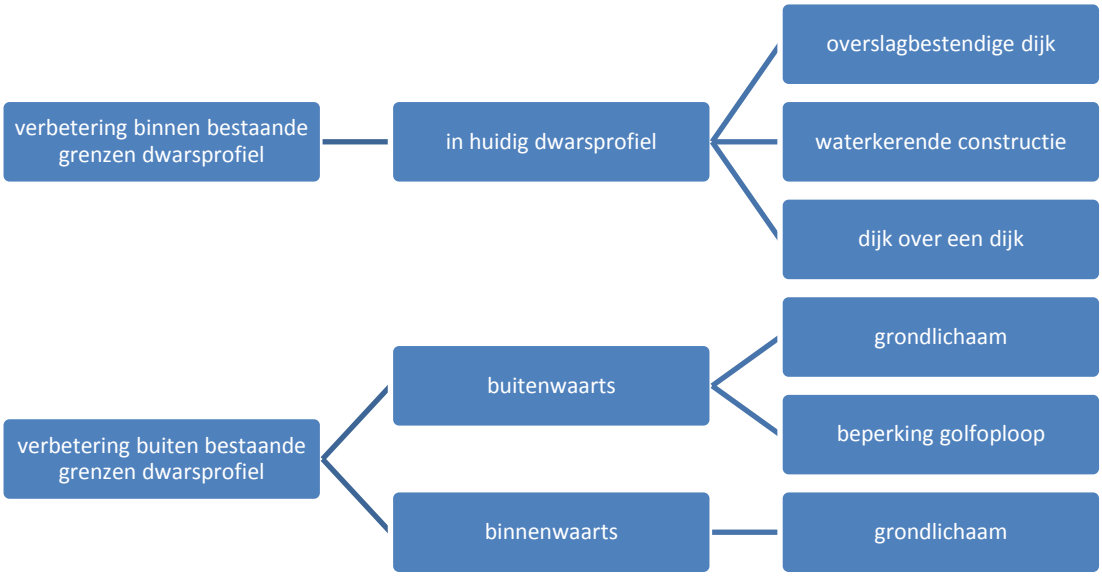
zullen niet aangepast worden. Er zal voor deze variant onderzocht moeten worden wat de mogelijke gevolgen zijn voor het achterland bij het falen of bezwijken van een waterkering.

3.2.2 Variant 1: aanpassen waterkering

Variant 1 bestaat uit het aanpassen van de huidige situatie waarbij alleen de waterkering verbeterd wordt. De waterkering wordt hierbij verhoogd en/of versterkt, zodat maatregelen voor het achterland en eventuele aanpassingen voor achterliggende waterkeringen niet benodigd zijn. Bij het verbeteren van een dijk wordt er vaak naar gestreefd zoveel mogelijk het oude, goed gezette dijklichaam in tact te laten en als geheel in de nieuwe constructie op te nemen. Bij deze variant kunnen twee verschillende oplossingsrichtingen onderscheiden worden:

- verbetering binnen bestaande grenzen dwarsprofiel;
- verbetering buiten bestaande grenzen dwarsprofiel.

Alvorens de oplossingen in de volgende paragrafen te bespreken zijn de oplossingsrichtingen met bijbehorende subgroepen in Figuur 3.2 schematisch weergegeven.



Figuur 3.2 Oplossingsrichtingen variant 1

Verbetering binnen bestaande grenzen dwarsprofiel

De eerste oplossingsrichting betreft verbeteringsmaatregelen waarbij bijzondere constructies worden toegepast. Deze constructies zijn er op gericht het bestaande dwarsprofiel of de contouren van het profiel zoveel mogelijk te handhaven en de aanwezige waarden zoveel mogelijk te ontzien. Er zijn daarbij verschillende oplossingen voor het verbeteren binnen het bestaande dwarsprofiel:

1. overslagbestendige dijk;
2. waterkerende constructie;
3. dijk over een dijk.

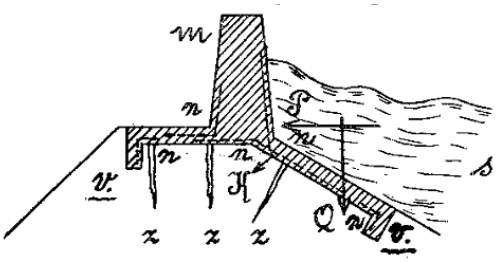
Hieronder worden deze verschillende oplossingen nader toegelicht.

1. Overslagbestendige dijk

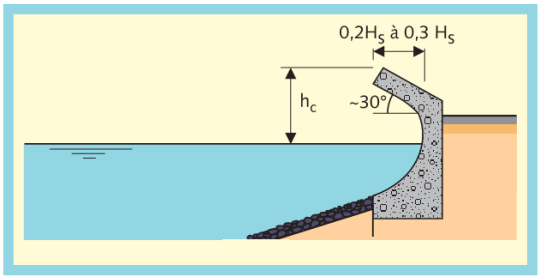
Bij een overslagdijk wordt een dijk dusdanig aangepast dat een bepaalde (maximum) hoeveelheid golfoverslag (een bepaald debiet behorend bij de veiligheidsnorm van de waterkering) mogelijk is, zonder dat de waterkering hierbij faalt of bezwijkt. Niet voldoende erosiebestendige bekleding dient vervangen te worden door erosiebestendige (steen- of asfalt-) bekleding. Andere functies van de waterkering kunnen bij golfoverslag mogelijk belemmerd worden (bijvoorbeeld wegverkeer).

2. Waterkerende constructie met grondconstructie

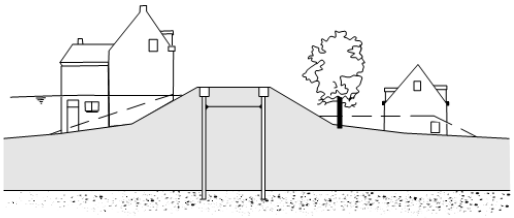
In het geval van een waterkerende constructie met grondconstructie wordt een dijk versterkt door het plaatsen van een muur (de Muralt-muur), damwand (staal), diepwand (beton), of kistdam (meestal twee evenwijdige damwandschermen gekoppeld door ankers) die meestal ter plaatse van de kruin van een dijk wordt aangebracht. Deze constructies worden meestal alleen gebruikt in situaties waar ruimtegebrek is bij dijkversterking waarbij bijvoorbeeld huizen verwijderd zouden moeten worden. Verder mogen muren, zoals een de Muralt-muur, alleen maar gebruikt worden voor het keren van water ten gevolge van golfoploop en – overslag.



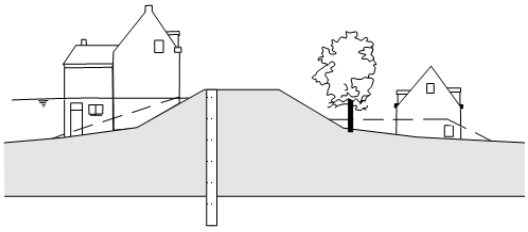
Figuur 3.3 Algemene doorsnede van een dijkverhoging met een betonmuur (Muralt, 1931)



Figuur 3.4 Parapet op keermuur langs boulevard (TAW, 1999)



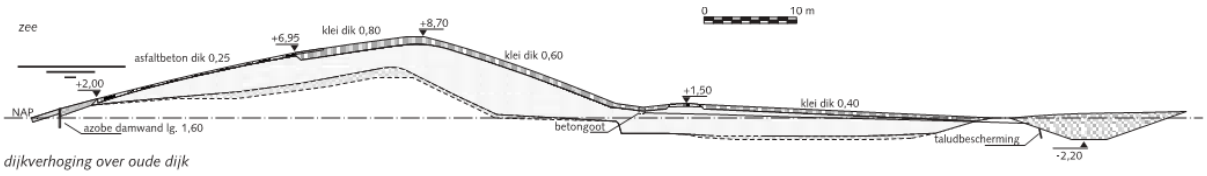
Figuur 3.5 Kistdam i.p.v. verflauwen taluds en amoveren woningen (TAW, 2004)



Figuur 3.6 Diepwand i.p.v. verflauwen taluds en amoveren woningen (TAW, 2004)

3. Dijk over oude dijk

Bij een dijk over een oude dijk wordt de dijk min of meer symmetrisch (zowel aan de binnen als de buitenzijde) verbeterd. Dit wordt meestal toegepast als de omstandigheden hiertoe dwingen, bijvoorbeeld bij ruimtegebrek.



Figuur 3.7 Dijk over oude dijk (TAW, 2001)

Verbetering buiten bestaande grenzen dwarsprofiel

Bij de tweede oplossingsrichting wordt de bestaande waterkering, binnen- of buitendijks verbeterd, waarbij de grenzen van het huidige profiel overschreden worden. Er zijn daarbij verschillende oplossingen voor het verbeteren buiten het bestaande dwarsprofiel:

1. buitenwaarts;
2. binnenwaarts.

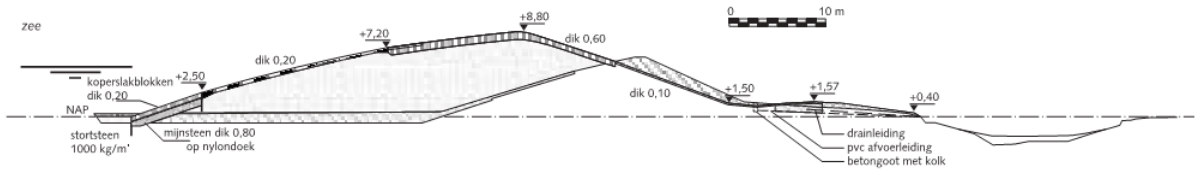
Hieronder worden deze verschillende oplossingen nader toegelicht.

1. Buitenwaarts

Bij verbetering van de bestaande waterkering buitenwaarts wordt verhoging aan de buitenzijde van de waterkering toegepast. Deze verhoging kan plaatsvinden door het aanbrengen van een

grondlichaam aan de buitenzijde. Een buitenwaartse verbetering wordt meestal toegepast als op het buitenbeloop geen, of een onvoldoende sterke bekleding aanwezig is.
Ook kan door beperking van de golfoploop worden volstaan met een lagere kruin, wat kan worden bereikt door aanpassingen buitenwaarts:

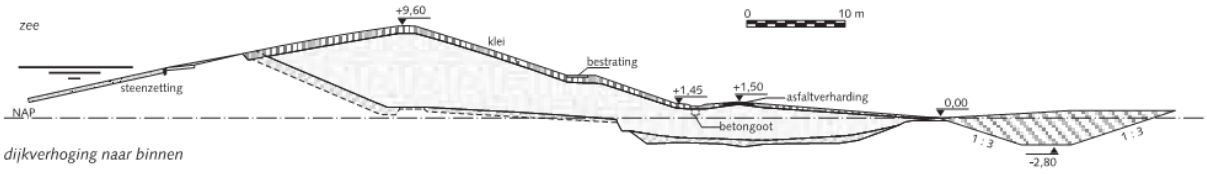
- Flauwer buitentalud
  Een flauwere helling van het buitentalud heeft minder overslag tot gevolg.
- Hoger voorland
  Een hoger voorland zorgt ervoor dat (de hoogste) golven breken (indien dit nog niet het geval is), met als gevolg een lagere golfhoogte bij de teen van de waterkering.
- Golfremmende constructie (zie paragraaf 3.2.3);
  Een golfremmende constructie, bijvoorbeeld in de vorm van een golfbreker of een kunstmatig rif, zorgt ervoor dat (de hoogste) golven breken (indien dit nog niet het geval is), met als gevolg een lagere golfhoogte bij de teen van de waterkering.
- Ruwer buitenbeloop
  Een ruwer buitenbeloop zorgt voor vermindering van de golfoploop.
- Buitenberm
  Het aanleggen of verbreden en/of op de juiste hoogte plaatsen van een berm (op het niveau van MHW + eventuele lokale toeslagen) zorgt voor vermindering van de golfoploop.



Figuur 3.8 Buitenwaartse dijkverzwaring (TAW, 2001)

2. Binnenwaarts

Bij verbetering van de bestaande waterkering binnenwaarts wordt verhoging aan de binnenzijde van de waterkering toegepast. Deze verhoging kan plaatsvinden door het aanbrengen van een grondlichaam aan de binnenzijde. Een binnendijkse verbetering wordt meestal toegepast als het buitentalud is voorzien van een goede glooiingsconstructie.



Figuur 3.9 Binnenwaartse dijkverzwaring (TAW, 2001)

3.2.3 Variant 2: plaatsen nieuwe waterkering

Variant 2 bestaat uit het vernieuwen van de huidige situatie waarbij een nieuwe waterkering wordt aangelegd, zodat aanpassingen voor de huidige waterkering, het achterland en eventueel achterliggende waterkeringen niet benodigd zijn. De nieuwe waterkering wordt aangelegd direct naast of op enige afstand van de bestaande waterkering. Bij deze variant kunnen twee verschillende oplossingsrichtingen onderscheiden worden:

1. buitenzijde;
2. binnenzijde.

Er kan hierbij onderscheid worden gemaakt voor verschillende locaties en constructies. Deze zijn in Figuur 3.10 schematisch weergegeven.



Figuur 3.10 Oplossingsrichtingen variant 2

1. Buitenzijde

In het geval van een nieuwe waterkering aan de buitenzijde wordt een nieuwe waterkering voor de huidige waterkering aangelegd. Er zijn hierbij twee oplossingen te onderscheiden:

a. waterkering;
b. kunstmatige riffen.

De nieuwe waterkering zal de functie waterkeren van de huidige waterkering overnemen, zodat verbeteringen aan de huidige waterkering niet meer nodig zijn. Bij deze oplossing kan er ook voor worden gekozen om de nieuwe waterkering te laten functioneren in samenwerking met de oude dijk. Niet alleen een nieuwe waterkering aan de buitenzijde kan een oplossing vormen, maar ook reductie van de hydraulische randvoorwaarden. Bij de reductie van hydraulische randvoorwaarden kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de toepassing van kunstmatige riffen. Bij een dergelijke constructie nemen de golfoploop en –overslag bij de huidige waterkering af, waardoor de hoogte van de huidige waterkering niet of in mindere mate verbetert hoeft te worden.

2. Binnenzijde

In het geval van een nieuwe waterkering aan de binnenzijde wordt een nieuwe dijk achter de Afsluitdijk aangelegd. De huidige waterkering zal de functie waterkeren behouden, echter is er bij falen of bezwijken van de huidige waterkering een achterliggende waterkering aanwezig die op dat moment de functie waterkeren zal overnemen.

3.2.4 Combinaties

In voorgaande paragrafen zijn diverse oplossingen voor het verbeteren van waterkeringen besproken. Deze oplossingen zijn op vele manieren te combineren, vooral als het om de optimalisatie van een verbetering gaat kunnen hier voordelen mee behaald worden. Aangezien de combinatie van oplossingen vaak locatiegebonden zijn, worden deze niet behandeld.

3.3 Verbeteringsmaatregelen Afsluitdijk

Om de Afsluitdijk weer aan de veiligheidsnormen te kunnen laten voldoen zijn er vele oplossingen. Deze oplossingen dienen gebaseerd te zijn op de Wet op Waterkeren. Aan de hand van vastgestelde criteria zullen de oplossingen van paragraaf 3.2 bij toepassing op de Afsluitdijk worden vergeleken. Nadat alle oplossingen zijn besproken zal een overzicht worden gegeven waarna er een conclusie getrokken zal worden.

Rijkswaterstaat Dienst IJsselmeergebied heeft een integraal verkennend onderzoek (Rijkswaterstaat, 2006) uit laten voeren waarin de veiligheidsproblematiek rondom de Afsluitdijk geheel in kaart is gebracht en de oplossingsrichtingen zijn verkend. In dit onderzoek is onderscheid gemaakt tussen oplossingen voor het dijklichaam en kunstwerken (spui- en schutsluizen) van de Afsluitdijk. In het voorliggende afstudeerrapport zal alleen worden gekeken naar oplossingen voor het dijklichaam aangezien het dijklichaam de locatie is waarvoor de mogelijkheden voor plaatsing van fotovoltaïsche zonnepanelen zullen worden beschouwd.

3.3.1 Toelichting aspecten vergelijking

In de volgende paragrafen zullen de verschillende varianten met hun oplossingen op systematische wijze worden besproken. Per methode zullen de volgende aspecten worden behandeld:

A. Methode: het principe van de oplossing zal worden besproken.
B. Algemene gegevens: enkele kengetallen van de oplossing worden hier weergegeven. Te denken valt aan de breedte van de eventuele aanpassing aan de Afsluitdijk, het volume van een grondlichaam, het materiaalgebruik, et cetera.
C. Voor- en nadelen: de voordelen (aangegeven met '+') en nadelen (aangegeven met '-') van de oplossing voor verschillende aspecten worden behandeld.

Criteria

Om een vergelijking tussen de verschillende oplossingen te kunnen maken, zijn een aantal criteria vastgesteld. Deze criteria moeten leiden tot het kunnen aangeven of een oplossing een optie is voor het verhogen van de veiligheid voor waterkering de Afsluitdijk. De vergelijking richt zich hoofdzakelijk op de civieltechnische aspecten aangezien het hier de veiligheid verhogende oplossingen betreft. De oplossingen dienen dan ook allemaal te voldoen aan de veiligheidsnormen.

De betreffende criteria zijn:

A. Robuustheid: dit criterium geeft aan in welke mate de oplossing een degelijke oplossing is. Er wordt bekeken of het een fragiele oplossing is en of deze voor een lange(re) periode kan functioneren. Verder wordt bekeken of er tegemoet wordt gekomen aan allerlei toekomstige ontwikkelingen ten aanzien van de veiligheid tegen overstromingen en de verschillende functies en of een oplossingsrichting in de toekomst nog wel goed toetsbaar blijkt te zijn.
B. Technische haalbaarheid: dit criterium geeft aan in welke mate de oplossing realiseerbaar is en de benodigde technologieën beschikbaar en betrouwbaar zijn.
C. Effecten op gebruiksfuncties: dit criterium geeft aan in welke mate de huidige gebruiksfuncties van de Afsluitdijk beïnvloed worden.
D. Zoutconcentratie IJsselmeer: dit criterium geeft aan of en in welke mate een verhoogd zoutgehalte bij de inlaatpunten (voor drinkwater, landbouw en peilbeheersing) in het IJsselmeer zal optreden. Een oplossing met een gelijkblijvende zoutconcentratie in het water van het IJsselmeer krijgt een hogere score toebedeeld dan in het geval van een toename van de zoutconcentratie.
E. Aanpassingen: dit criterium geeft aan in welke mate de huidige situatie aangepast dient te worden en wat de consequenties zijn op het gebied van de uitvoering. Er kan hierbij worden gedacht aan de uitvoeringsmethode (eenvoudig of complex), aan de verplaatsing van wegen, of (en hoeveel) grondverzet er noodzakelijk is, et cetera. Oplossingen met een relatief eenvoudige methode van uitvoeren zullen positief worden beoordeeld en vice versa;
F. Investeringskosten: dit criterium geeft in welke mate er kosten zijn voor deze oplossing. De kosten uit het rapport Integrale verkenning Afsluitdijk zullen worden gebruikt, of worden op kwalitatieve wijze bepaald. Methoden die relatief weinig kosten zullen positief worden beoordeeld en vice versa;
G. Realisatietijd: dit criterium indexeert de realisatietijd voor een oplossingsrichting. Methoden met een relatief korte realisatietijd zullen positief worden beoordeeld en vice versa;
H. Flora en fauna: dit criterium geeft aan wat de invloed van de oplossingsrichting op de flora en fauna van de Afsluitdijk, het IJsselmeer en de Waddenzee is.
I. Cultuurhistorische waarden: dit criterium geeft aan in welke mate een oplossing invloed uitoefent op de cultuurhistorische waarden. Er wordt bijvoorbeeld bekeken of de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhellingen, de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk en het aanzicht van de Afsluitdijk worden aangetast.

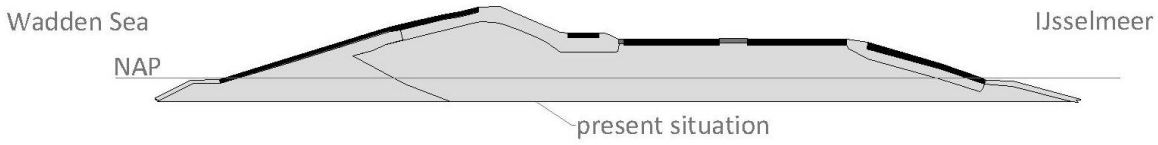
Materialen

Buiten voorgenoemde criteria wordt ook gelet op de toepassing van materialen waarmee de waterkering wordt aangepast. Hoofdzakelijk worden voor de oplossingen de materialen grond (klei of zand), (asfalt)beton en steen gebruikt. Grond is bijvoorbeeld een flexibel materiaal dat

ongelijkmatige zettingen goed kan volgen, terwijl dit voor beton met grotere oppervlakken niet geldt. Verder wordt bijvoorbeeld ook naar de verwerkbaarheid gekeken.

3.3.2 Variant 0: nulsituatie Afsluitdijk

De nulsituatie betreft de huidige situatie van de Afsluitdijk, waarbij aanpassingen voor de Afsluitdijk niet aan de orde zijn. Het bijbehorende gemiddelde dwarsprofiel van de Afsluitdijk (huidige situatie) is weergegeven in Figuur 3.11.



Figuur 3.11 Gemiddeld dwarsprofiel Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2006)

Er zijn binnen deze variant twee oplossingsrichtingen voor de Afsluitdijk te benoemen:
1. geen verbeteringen;
2. maatregelen achterland.

Geen verbeteringen

Bij deze oplossingsrichting worden voor zowel de Afsluitdijk als de achterliggende waterkeringen geen verbeteringen gerealiseerd. De Afsluitdijk voldoet hierbij niet aan de veiligheidsnorm van 1/10.000 (zie paragraaf 2.6.4 voor de toetsresultaten) en de veiligheid tegen overstromen van het achterland is ook niet gegarandeerd.

Methode

Er is geen sprake van een methode aangezien dit de nulsituatie betreft.

Algemene gegevens

- Kruinhoogte Afsluitdijk: 7,80 m +NAP;
- Verbreding Afsluitdijk: 0 m;
- Grondverzet Afsluitdijk: 0 m^3/m;
- Toegepaste materialen: geen;
- Kosten (schatting): geen.

Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van het behouden van de huidige situatie zijn:

- De huidige situatie is niet robuust aangezien de Afsluitdijk niet aan de veiligheidsnormen voldoet en er (in de toekomst) kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk aanwezig is. Het gevolg is dat de achterliggende waterkeringen aan het IJsselmeer en Ketelmeer te maken krijgen met een extra waterschijf (0,05 – 0,30 m) en zwaardere hydraulische randvoorwaarden. De kans dat (een deel van) deze achterliggende waterkeringen ook faalt of bezwijkt, neemt hierbij toe: uit achterlandstudie blijkt dat ongeveer 19 km onvoldoende hoog is, ongeveer 5 km instabiel is en één kunstwerk onvoldoende scoort. (Rijkswaterstaat, 2006) (A)
- Indien geen verbeteringen aan de Afsluitdijk worden gerealiseerd kunnen er bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk grote gevolgen voor de gebruiksfuncties optreden, zoals maandenlange verzilting van het IJsselmeer, jarenlang ontregeld peilbeheer (met de nodige overlast voor het omringende gebied) of beperkte schutcapaciteit, dan wel het onbruikbaar zijn van rijksweg A7. (C)
- Er is door zwaardere hydraulische randvoorwaarden een toenemende kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk. Hierbij kan instroom van zoutwater in het IJsselmeer optreden, wat een verhoogde zoutconcentratie bij de inlaatpunten oplevert. (D)
- Er zijn geen investeringskosten. Echter bestaat de kans op indirect hoge kosten bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk (en achterliggende waterkering(en)) vanwege een verstoorde

drinkwatervoorziening door een brak IJsselmeer, geen directe verbinding tussen Friesland en Noord-Holland. De herstelkosten bedragen waarschijnlijk meer dan de kosten voor het verbeteren van de Afsluitdijk zelf. (F)
- Er kan (lichte) verzilting van het IJsselmeer optreden (bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk) met eventueel negatieve gevolgen voor flora en fauna in het IJsselmeer. (H)
- Bij het behouden van de huidige situatie worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhellingen, de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. Echter bestaat de kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk als er geen beschermende maatregelen worden getroffen. Het gevolg kan zijn dat specifieke kenmerken van de Afsluitdijk worden aangetast. (I)

Maatregelen achterland

Een andere oplossingsrichting is dat er geen verbeteringen voor de Afsluitdijk worden gerealiseerd, waarbij voor het achterland, bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk, echter wel beschermende maatregelen tegen overstromen zijn genomen. De achterliggende waterkeringen rond het IJssel- en Ketelmeer zullen bestand moeten zijn tegen een hogere waterstand en zwaardere hydraulische randvoorwaarden. Uit achterlandstudie (Rijkswaterstaat, 2006) blijkt dat 19 km van de dijken in dat geval onvoldoende hoog is, ongeveer 5 km instabiel is en één kunstwerk onvoldoende scoort. Om te voldoen aan de veiligheidsnorm van 1/10.000 zullen deze waterkeringen moeten worden versterkt.

Methode

De methode van maatregelen achterland betreft het verbeteren van de achterliggende waterkeringen.

Algemene gegevens

- Kruinhoogte Afsluitdijk: 7,80 m +NAP;
- Verbreding Afsluitdijk: 0 m;
- Grondverzet Afsluitdijk: 0 m^3/m (wel grondverzet voor achterliggende waterkeringen);
- Materiaalgebruik: geen (voor achterliggende waterkeringen: grond (en eventueel bekledingsmaterialen) en materiaal om de kunstwerken aan te passen);
- Kosten (schatting): 115 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van beschermende maatregelen voor het achterland zijn:
- Deze oplossingsrichting is niet robuust aangezien de Afsluitdijk niet aan de veiligheidsnormen voldoet en er (in de toekomst) kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk aanwezig is. (A)
- Indien geen verbeteringen aan de Afsluitdijk worden gerealiseerd kunnen er bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk grote gevolgen optreden voor de gebruiksfuncties, zoals maandenlange verzilting van het IJsselmeer, jarenlang ontregeld peilbeheer (met de nodige overlast voor het omringende gebied) of beperkte schutcapaciteit, dan wel het onbruikbaar zijn van rijksweg A7. (C)
- Er is door zwaardere hydraulische randvoorwaarden een toenemende kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk. Hierbij kan instroom van zoutwater in het IJsselmeer optreden, wat een verhoogde zoutconcentratie bij de inlaatpunten oplevert. (D)
- De achterliggende waterkeringen zullen moeten worden aangepast en daardoor bestand zijn tegen een extra waterschijf van 0,05 – 0,30 m (verhoging van 19 km dijk, verbetering van 5 km dijk en verbetering van één kunstwerk) (Rijkswaterstaat, 2006). Aanpassingen aan de Afsluitdijk worden bij deze oplossing niet gedaan. (E)
- Voor het verbeteren van de achterliggende waterkeringen bedragen de investeringskosten naar schatting 115 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). Echter bestaat de kans op indirect hoge kosten bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk vanwege een verstoorde drinkwatervoorziening door een brak IJsselmeer, geen directe verbinding tussen Friesland en Noord-Holland. De

herstelkosten bedragen waarschijnlijk meer dan de kosten voor het verbeteren van de Afsluitdijk zelf. (F)
- Gezien de aard en de lengte van de te verbeteren achterliggende waterkeringen zal de realisatietijd van deze oplossing lang zijn. (G)
- Er kan (lichte) verzilting van het IJsselmeer optreden (bij falen of bezwijken van de Afsluitdijk) met eventueel negatieve gevolgen voor flora en fauna in het IJsselmeer. (H)
- Bij het behouden van de huidige situatie worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhellingen, de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. Echter bestaat de kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk als er geen beschermende maatregelen worden getroffen. Het gevolg kan zijn dat specifieke kenmerken van de Afsluitdijk worden aangetast. (I)

3.3.3 Variant 1: aanpassen Afsluitdijk

Bij variant 1 wordt alleen de Afsluitdijk verbeterd, zodat wordt voldaan aan de veiligheidsnorm van 1/10.000. Aanpassingen voor de achterliggende waterkeringen rond het IJssel- en Ketelmeer zijn niet benodigd. Er zijn binnen deze variant twee oplossingsrichtingen voor de Afsluitdijk te benoemen:

A. verbetering binnen bestaande grenzen dwarsprofiel;
B. verbetering buiten bestaande grenzen dwarsprofiel.

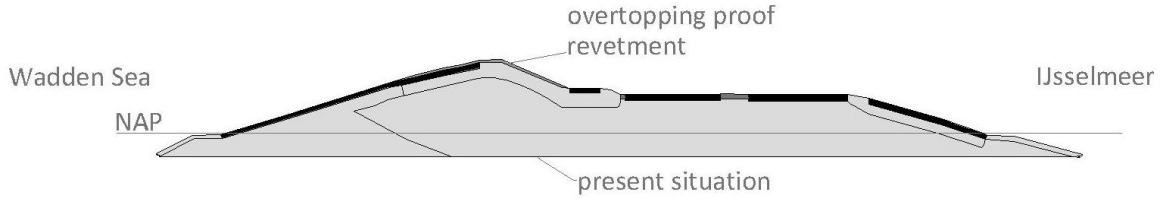
Verbetering binnen bestaande grenzen dwarsprofiel

Bij deze oplossingsrichting wordt het bestaande dwarsprofiel of de contouren van het profiel zoveel mogelijk gehandhaafd en de aanwezige waarden zoveel mogelijk ontzien. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in drie oplossingen overslagbestendige dijk, waterkerende constructie, en dijk over een dijk, die hieronder worden toegelicht.

1. Overslagbestendige dijk

Methode

Bij het overslagbestendig maken van de Afsluitdijk wordt de dijkbekleding dusdanig aangepast dat een debiet van 40 l/m/s ten gevolge van golfoverslag (bij een veiligheidsnorm van 1/10.000) nog acceptabel is (Rijkswaterstaat, 2006).



Figuur 3.12 Overslagbestendige dijk

Algemene gegevens

- Kruinhoogte Afsluitdijk: 7,80 m +NAP;
- Verbreding Afsluitdijk: 0 m;
- Grondverzet Afsluitdijk: 0 m^3/m;
- Materiaalgebruik: asfalt, beton, of steen;
- Kosten (schatting): 77 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van een overslagbestendige dijk zijn:

- Deze oplossing is in mindere mate robuust aangezien bij wijzigende hydraulische randvoorwaarden (stijgende zeespiegel) de hoeveelheid overslag toeneemt en de Afsluitdijk alsnog opgehoogd dient te worden. Verder voldoet de Afsluitdijk bij deze optie wel aan de veiligheidsnormen (door het aanpassen van de bekleding) en wordt verdere verbetering niet geblokkeerd. (A)

- Deze oplossing is technisch haalbaar, aangezien er ervaring is met deze methode en deze redelijk betrouwbaar is. (B)
- Indien de Afsluitdijk overslagbestendig wordt gemaakt, kan er door golfoverslag overlast met betrekking tot de gebruiksfuncties ontstaan, zoals de instroom van zoutwater in het IJsselmeer, of beperkte schutcapaciteit, dan wel het onbruikbaar zijn van rijksweg A7. (C)
- Er is door zwaardere hydraulische randvoorwaarden een toenemende kans op overlopen van, golfoploop en –overslag over de Afsluitdijk. Hierbij treedt instroom van zoutwater in het IJsselmeer op, wat een verhoogde zoutconcentratie bij de inlaatpunten oplevert. (D)
- Om de Afsluitdijk overslagbestendig te maken dienen de grasbekleding van de bovenzijde van het buitentalud, de kruin, het binnentalud en de groene tussenbermen te worden vervangen door erosiebestendige (steen- of (asfalt)beton)bekleding. Voor deze aanpassing zijn licht ingrijpende maatregelen zoals een geringe verhoging van de kruin. Het verplaatsen van wegen is niet noodzakelijk nodig. (E)
- Om de Afsluitdijk overslagbestendig te maken bedragen de investeringskosten naar schatting 77 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). (F)
- Gezien de aard van de verbetering zal de realisatietijd van deze oplossing niet heel lang zijn. (G)
- Er kan (lichte) verzilting van het IJsselmeer kan optreden (bij overlopen van de Afsluitdijk) met eventueel negatieve gevolgen voor flora en fauna in het IJsselmeer. (H)
- Bij het creëren van een overslagbestendige Afsluitdijk worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling en de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk veranderen niet. Het aanzicht van de Afsluitdijk verandert in lichte mate. (I)

2. Waterkerende constructie

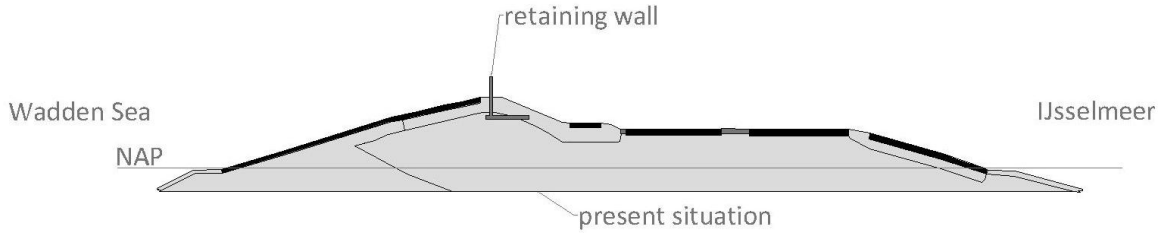
Bij deze oplossing wordt een speciale constructie gebruikt om het water te keren. Er kan hierbij onderscheid worden gemaakt in twee opties:

a. muren;
b. damwanden, diepwanden en kistdammen.

a. Muren

Methode

De methode van het plaatsen van een keermuur op de kruin betreft bijvoorbeeld het aanbrengen van geprefabriceerde betonnen elementen.



Figuur 3.13 Muur

Een muur op de kruin mag alleen gebruikt worden om golfoploop en –overslag tegen te houden. Tegen overlopen mag een muur niet gebruikt worden aangezien deze daar niet tegen bestand is. Om voorgenoemde reden kan, om zonder overlopen te voldoen aan de gestelde veiligheidsnormen, deze optie niet op zichzelf toegepast worden.

Algemene gegevens

- Kruinhoogte Afsluitdijk: 8,55 m +NAP (Rijkswaterstaat, 2006);
- Verbreding Afsluitdijk: 0 m;
- Grondverzet Afsluitdijk: 0 m^3/m;
- Materiaalgebruik: steen of beton;

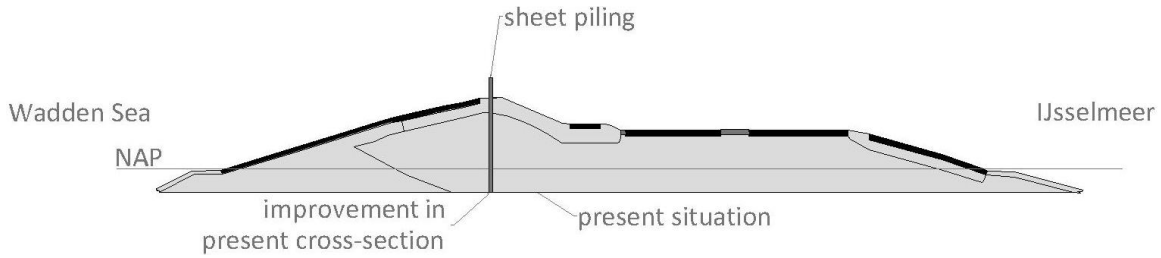
- Kosten (schatting): 225 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van een muur op de kruin zijn:

- Deze optie is niet robuust aangezien een muur in steen of beton wordt uitgevoerd en deze verdere verbetering van de Afsluitdijk enigszins bemoeilijkt. Verder is de robuustheid afhankelijk van de toegepaste bekleding aan de buitenzijde, welke zwaarder uitgevoerd zal moeten worden. De indirecte golfbelasting op het buitentalud neemt toe doordat water tegen de wand slaat en weer terugstroomt. Verder is deze oplossing moeilijk te toetsen op faalmechanismen zoals onderloopsheid. (A)
- Deze optie is technisch haalbaar, aangezien er ervaring is met deze methode. De methode is betrouwbaar, maar een goede controle is noodzakelijk. (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. (C)
- Door het plaatsen van een muur, vermindert de kans op instroom van zoutwater in het IJsselmeer ten gevolge van falen of bezwijken van de Afsluitdijk, met als gevolg een positief effect op de zoutconcentratie bij de inlaatpunten. (D)
- Bij deze optie wordt een muur in de vorm van geprefabriceerde betonnen elementen op de kruin geplaatst. Voor deze aanpassing zijn geen ingrijpende maatregelen zoals het verplaatsen van wegen of grote hoeveelheden grond nodig. (E)
- Om een muur op de kruin van de Afsluitdijk te plaatsen bedragen de investeringskosten naar schatting 225 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). (F)
- Gezien de aard van de verbetering zal de realisatietijd van deze oplossing niet heel lang zijn. (G)
- Bij het plaatsen van een muur op de kruin worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling en de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk veranderen niet. Het aanzicht van de Afsluitdijk verandert in lichte mate. (I)

b. Damwanden, diepwanden en kistdammen

Methode
De methode van het plaatsen van damwanden, diepwanden of kistdammen betreft het aanbrengen een beton- of staalconstructie die zorgt voor een kruinverhoging.



Figuur 3.14 Damwand of diepwand

Een damwand, diepwand of kistdam kan in tegenstelling tot een keermuur wel gebruikt worden voor het keren van water.

Algemene gegevens

- Kruinhoogte Afsluitdijk: 8,55 m +NAP (schatting (Rijkswaterstaat, 2006));
- Verbreding Afsluitdijk: 0 m;
- Grondverzet Afsluitdijk: 0 m^3/m;
- Materiaalgebruik: beton of staal;
- Kosten (schatting): 225 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van toepassing van een damwand, diepwand of kistdam zijn:

- Deze optie is niet robuust aangezien deze met staal wordt uitgevoerd en dit verdere verbetering van de Afsluitdijk enigszins bemoeilijkt. Verder is de robuustheid is afhankelijk van de toegepaste bekleding aan de buitenzijde, welke zwaarder uitgevoerd zal moeten worden. De indirecte golfbelasting op het buitentalud neemt toe doordat water tegen de wand slaat en weer terugstroomt. Verder is deze oplossing moeilijk te toetsen op de kwaliteit van het staal van de damwanden en op faalmechanismen zoals onderloopsheid. (A)
- Deze optie is technisch haalbaar, aangezien er ervaring is met deze methode. De methode is betrouwbaar, maar een goede controle is noodzakelijk. (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. (C)
- Door het plaatsen van een damwand, diepwand of kistdam, vermindert de kans op instroom van zoutwater in het IJsselmeer ten gevolge van falen of bezwijken van de Afsluitdijk, met als gevolg een positief effect op de zoutconcentratie bij de inlaatpunten. (D)
- Bij deze oplossing wordt een damwand, diepwand of kistdam geplaatst waarvoor geen ingrijpende maatregelen, zoals het verplaatsen van wegen of grote hoeveelheden grond, nodig zijn. Dit levert een gematigd positieve score voor dit criterium op. (E)
- Om een damwandconstructie op de Afsluitdijk te plaatsen bedragen de investeringskosten naar schatting 225 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). (F)
- Gezien de aard van de verbetering zal de realisatietijd van deze oplossing niet heel lang zijn. (G)
- Bij het plaatsen van een damwand op de kruin worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling en de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk veranderen niet. Het aanzicht van de Afsluitdijk verandert in lichte mate. (I)

3. Dijkverhoging over oude dijk

Methode
De methode van een dijkverhoging over de oude dijk betreft een grondconstructie (binnen de bestaande grenzen van het dwarsprofiel) die zorgt voor een kruinverhoging.

Algemene gegevens
- Kruinhoogte Afsluitdijk: 10,00 m +NAP (Rijkswaterstaat, 2006);
- Verbreding Afsluitdijk: 0 m (Rijkswaterstaat, 2006);
- Grondverzet Afsluitdijk: ordegrootte 300 m^3/m (Rijkswaterstaat, 2006);
- Materiaalgebruik: grond, beton, steen;
- Kosten (schatting): 369 miljoen euro (gebaseerd op dijkverbetering binnenwaarts).

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van de oplossing dijk over een dijk zijn:
- Deze oplossing is robuust aangezien de Afsluitdijk aan de veiligheidsnormen voldoet en verdere verbetering niet wordt geblokkeerd. (A)
- Deze oplossing is technisch haalbaar, aangezien er veel ervaring is met deze methode en deze betrouwbaar is. (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. (C)
- Door het verhogen van de Afsluitdijk op de as, vermindert de kans op instroom van zoutwater in het IJsselmeer ten gevolge van falen of bezwijken de Afsluitdijk, met als gevolg een positief effect op de zoutconcentratie bij de inlaatpunten. (D)
- Bij deze verbetering wordt de Afsluitdijk verhoogd op de as van de dijk, waarbij aan zowel de binnen- als buitenzijde een nieuwe steenbekleding aangebracht dient te worden. Tevens dienen rijksweg A7 en het fietspad opnieuw aangelegd te worden en zullen steilere taluds (of speciale constructies) benodigd zijn aangezien de dijk wel hoger maar niet breder wordt. (E)
- Om de Afsluitdijk op de as te verbeteren bedragen de hoge investeringskosten naar schatting 369 miljoen euro (gebaseerd op dijkverbetering binnenwaarts). (F)

- Gezien de aard van de verbetering zal realisatie van deze oplossing langere tijd in beslag nemen. (G)
- Bij de methode dijk over een dijk worden de cultuurhistorische waarden deels aangetast: de rechtlijnigheid en de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk veranderen niet. De taludhellingen en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen in lichte mate. (I)

Verbetering buiten bestaande grenzen dwarsprofiel

Bij deze oplossingsrichting vindt verbetering plaats buiten de grenzen van het bestaande dwarsprofiel. De twee oplossingen buitenwaarts en binnenwaarts worden hieronder behandeld.

1. Buitenwaarts

Bij deze oplossing vindt dijkverbetering plaats in de richting van de Waddenzee. De twee opties:

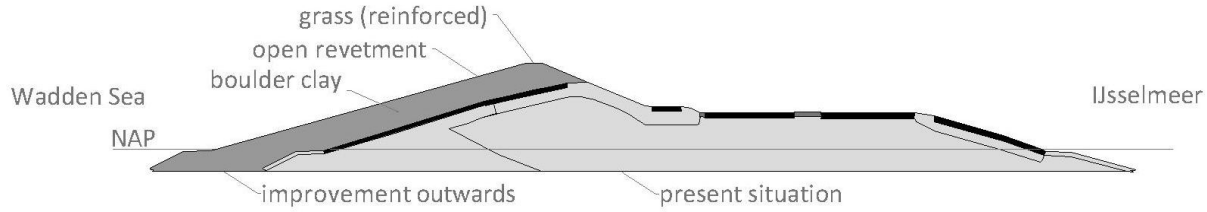
a. grondlichaam
b. beperking golfoploop

worden hieronder nader toegelicht.

1.a. Grondlichaam

Methode

Bij verbetering van de bestaande waterkering buitenwaarts wordt verhoging aan de buitenzijde van de Afsluitdijk toegepast. Het binnentalud wordt doorgetrokken naar de benodigde kruinhoogte en het buitentalud wordt verschoven richting Waddenzee (zie Figuur 3.15).



Figuur 3.15 Dijkverbetering buitenwaarts

Algemene gegevens

- Kruinhoogte: 10 m +NAP (Rijkswaterstaat, 2006);
- Verbreding dijk: circa 20 m (Rijkswaterstaat, 2006);
- Grondverzet: circa 230 m^3/m (Rijkswaterstaat, 2006);
- Materiaalgebruik: grond, steenbekleding;
- Kosten (schatting): 391 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van verbetering buitenwaarts zijn:

- Deze optie is robuust aangezien de Afsluitdijk aan de veiligheidsnormen voldoet en verdere verbetering niet wordt geblokkeerd. (A)
- Deze optie is technisch haalbaar, aangezien er veel ervaring is met deze methode en deze betrouwbaar is. (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. (C)
- Door buitenwaartse verhoging, vermindert de kans op instroom van zoutwater in het IJsselmeer ten gevolge van falen of bezwijken van de Afsluitdijk, met als gevolg een positief effect op de zoutconcentratie bij de inlaatpunten. (D)
- Bij buitenwaartse verbetering wordt de Afsluitdijk verbreed en verhoogd richting Waddenzee, waarbij aan de buitenzijde een grondlichaam met steenbekleding aangebracht dient te worden. Rijksweg A7 en het fietspad kunnen op hun huidige plaats blijven. (E)
- Om de Afsluitdijk buitenwaarts te verbeteren bedragen de hoge investeringskosten naar schatting 391 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). (F)
- Gezien de aard van de verbetering zal realisatie van deze optie langere tijd in beslag nemen. (G)

- Enerzijds wordt er een grondlichaam aan de Waddenzeezijde van de Afsluitdijk aangelegd, wat mogelijk een geringe invloed op de flora en fauna zou kunnen hebben, anderzijds biedt dit ook de mogelijkheid voor het aanleggen van natuurvriendelijke oevers met dezelfde of betere kwaliteiten ten opzichte van de huidige situatie. (H)
- Bij het verbeteren van de Afsluitdijk buitenwaarts worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling, de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. (I)

1.b. Beperking golfoploop

Methode
Bij beperking van de golfoploop zijn voor de Afsluitdijk verschillende mogelijkheden. Deze zijn onderzocht (Rijkswaterstaat, 2006), waarvan de resultaten hieronder zijn weergegeven:
- Flauwer buitentalud: Hierbij gelden dezelfde bezwaren als bij buitenwaarts verbeteren met een grondlichaam. Verder zal gelet moeten worden op de erosiebestendigheid van het binnentalud;
- Ruwer buitentalud: Door het toepassen van bijvoorbeeld breuksteen gepenetreerd met gietasfalt wordt de overslag beperkt tot 13,0 l/s/m. Aangezien dit debiet teveel is dient deze oplossing gecombineerd te worden met een andere oplossing;
- Buitenberm: door het toepassen van een berm met een breedte van 50 m, wordt de overslag beperkt tot circa 1,1 l/s/m. Dit debiet is waarschijnlijk acceptabel, waarbij gelet dient te worden op de erosiebestendigheid van het binnentalud.

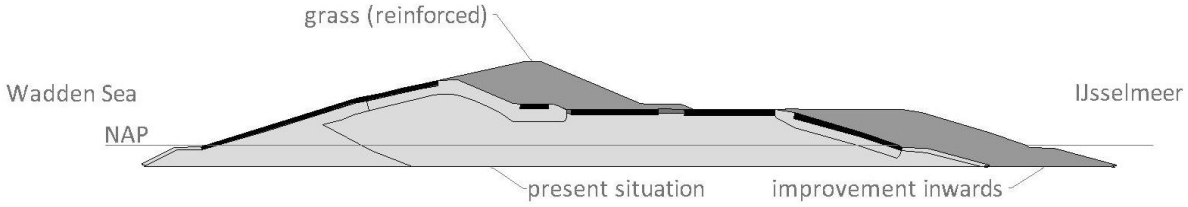
Algemene gegevens
- Kruinhoogte: 7,80 m +NAP;
- Verbreding dijk: orde 20 m (verflauwen buitentalud), 0 m (verruwen buitentalud), of orde 50 m (berm) (Rijkswaterstaat, 2006);
- Grondverzet: 230 m^3/m (verflauwen buitentalud), of 0 m^3/m (verruwen buitentalud), of orde 200 m^3/m (berm) (Rijkswaterstaat, 2006);
- Materiaalgebruik: grond (verflauwen buitentalud en berm), of steen (verruwen buitentalud);
- Kosten (schatting): orde tientallen miljoenen euro per optie.

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van beperking van de golfoploop zijn:
- Deze oplossing is in mindere mate robuust aangezien bij wijzigende hydraulische randvoorwaarden (stijgende zeespiegel) de hoeveelheid overslag toeneemt en de Afsluitdijk alsnog opgehoogd dient te worden. Verder voldoet de Afsluitdijk bij deze optie wel aan de veiligheidsnormen (door het aanpassen van de bekleding) en wordt verdere verbetering niet geblokkeerd. (A)
- Deze optie is technisch haalbaar, aangezien er ervaring is met deze methode en deze redelijk betrouwbaar is. (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. (C)
- Er is door zwaardere hydraulische randvoorwaarden een toenemende kans op overlopen van de Afsluitdijk. Hierbij kan instroom van zoutwater in het IJsselmeer optreden, wat een verhoogde zoutconcentratie bij de inlaatpunten oplevert. (D)
- Bij beperking van de golfoploop worden buitenwaarts maatregelen genomen. Rijksweg A7 en het fietspad kunnen op hun huidige plaats blijven. (E)
- Om de golfoploop bij de Afsluitdijk te beperken bedragen de investeringskosten naar schatting tientallen miljoenen euro. (F)
- Enerzijds wordt er een grondlichaam aan de Waddenzeezijde van de Afsluitdijk aangelegd, wat mogelijk een geringe invloed op de flora en fauna zou kunnen hebben, anderzijds biedt dit ook de mogelijkheid voor het aanleggen van natuurvriendelijke oevers met dezelfde of betere kwaliteiten ten opzichte van de huidige situatie. (H)

- Bij beperking van de golfoploop bij de Afsluitdijk worden de cultuurhistorische waarden niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling, de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. (I)

2. Binnenwaarts

Methode
Bij verbetering van de bestaande waterkering binnenwaarts met een grondlichaam wordt verhoging aan de binnenzijde van de Afsluitdijk toegepast. Het buitentalud wordt naar de benodigde kruinhoogte doorgetrokken, waarbij een verbreding van de (tuimel-)dijk naar de binnenzijde noodzakelijk is. Om dit te realiseren is een verbreding van het huidige dijklichaam nodig (zie Figuur 3.16).



Figuur 3.16 Dijkverbetering binnenwaarts

Algemene gegevens
- Kruinhoogte: 10 m +NAP (Rijkswaterstaat, 2006);
- Verbreding dijk: circa 20 m (Rijkswaterstaat, 2006);
- Grondverzet: circa 235 m^3/m (Rijkswaterstaat, 2006);
- Materiaalgebruik: grond, steenbekleding;
- Kosten (schatting): 369 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van verbetering binnenwaarts zijn:
- Deze optie is robuust aangezien de Afsluitdijk aan de veiligheidsnormen voldoet en verdere verbetering niet wordt geblokkeerd. (A)
- Deze optie is technisch haalbaar, aangezien er veel ervaring is met deze methode en deze betrouwbaar is. In de jaren ’70 zijn er zelfs verbeteringen aan de Afsluitdijk uitgevoerd volgens deze methode (Rijkswaterstaat, 2006). (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. (C)
- Door binnenwaartse verhoging, vermindert de kans op instroom van zoutwater in het IJsselmeer ten gevolge van falen of bezwijken van de Afsluitdijk, met als gevolg een positief effect op de zoutconcentratie bij de inlaatpunten. (D)
- Bij binnenwaartse verbetering wordt de Afsluitdijk verbreed en verhoogd aan de binnenzijde (richting IJsselmeer), waarbij aan de binnenzijde een grondlichaam met nieuwe steenbekleding aangebracht dient te worden. Tevens dienen rijksweg A7 en het fietspad verplaatst te worden. (E)
- Om de Afsluitdijk binnenwaarts te verbeteren bedragen de hoge investeringskosten naar schatting 369 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). (F)
- Gezien de aard van de verbetering zal realisatie van deze oplossing langere tijd in beslag nemen. (G)
- Enerzijds wordt er een grondlichaam aan de IJsselmeerzijde van de Afsluitdijk aangelegd, wat mogelijk een geringe invloed op de flora en fauna zou kunnen hebben, anderzijds biedt dit ook de mogelijkheid voor het aanleggen van natuurvriendelijke oevers met dezelfde of betere kwaliteiten ten opzichte van de huidige situatie. (H)

- Bij het verbeteren van de Afsluitdijk binnenwaarts worden de cultuurhistorische waarden deels aangetast: de rechtlijnigheid en de openheid van het landschap rond de Afsluitdijk veranderen niet. De karakteristieke taludhelling en het aanzicht van de Afsluitdijk verandert in lichte mate. (I)

3.3.4 Variant 2: plaatsen nieuwe waterkering

Variant bestaat uit het plaatsen van een nieuwe waterkering die ten minste de functie waterkeren van de Afsluitdijk overneemt, of deze functie samen met de Afsluitdijk vervult. In beide gevallen wordt voldaan aan de veiligheidsnorm 1/10.000. Er zijn verschillende oplossingsrichtingen voor het plaatsen van een nieuwe waterkering:

1. buitenzijde;
2. binnenzijde.

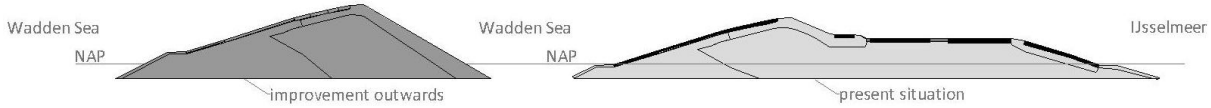
Hieronder worden deze twee oplossingsrichtingen nader toegelicht.

1. Buitenzijde

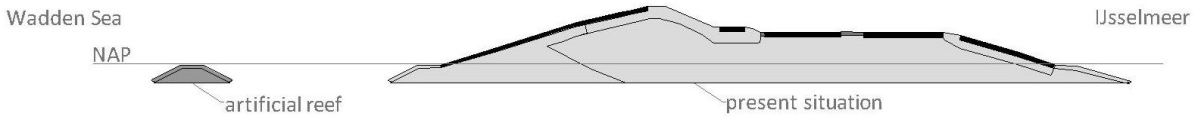
Methode

In het geval van een nieuwe waterkering aan de buitenzijde wordt een nieuwe dijk voor de Afsluitdijk aangelegd. De twee bijbehorende oplossingen zijn:

a. waterkering;
b. kunstmatige riffen.



Figuur 3.17 Nieuwe waterkering buitenzijde



Figuur 3.18 Kunstmatig rif

a. Waterkering

Algemene gegevens

- Kruinhoogte: 10 m +NAP;
- Dijkbreedte (op waterlijn): orde 100 m;
- Grondverzet: orde 1.000 m^3/m;
- Materiaalgebruik: zand, steenbekleding;
- Kosten (schatting): orde miljard euro (inclusief de aanleg van benodigde kunstwerken).

Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van een nieuwe waterkering in de Waddenzee zijn:

- Deze oplossing is robuust aangezien de Afsluitdijk aan de veiligheidsnormen voldoet en verdere verbetering niet wordt geblokkeerd. (A)
- Deze oplossing is technisch haalbaar, aangezien er veel ervaring is met deze methode en deze betrouwbaar is. (B)
- Doordat de kruin wordt verhoogd is er een positief effect op de gebruiksfuncties. Er kunnen zelfs nieuwe gebruiksfuncties worden aangetrokken. (C)
- Door het aanleggen van een nieuwe waterkering aan de buitenzijde, vermindert de kans op instroom van zoutwater in het IJsselmeer ten gevolge van falen of bezwijken van de Afsluitdijk, met als gevolg een positief effect op de zoutconcentratie bij de inlaatpunten. (D)

- Er zal een geheel nieuwe waterkering in de Waddenzee worden aangelegd, wat zeer veel werkzaamheden met zich mee brengt. (E)
- Om een nieuwe waterkering aan de buitenzijde aan te leggen bedragen de zeer hoge investeringskosten naar schatting in de orde van een miljard euro. (F)
- Gezien de aard van de oplossing zal realisatie hiervan lange tijd in beslag nemen. (G)
- Enerzijds wordt er een grondlichaam in de Waddenzee aangelegd, wat mogelijk een behoorlijke negatieve invloed op de flora en fauna zou kunnen hebben, anderzijds biedt dit ook nieuwe kans voor het creëren van een natuurvriendelijke omgeving met dezelfde of betere kwaliteiten ten opzichte van de huidige situatie. Echter wordt verwacht dat de nadelen niet opwegen tegen de voordelen, bijvoorbeeld omdat het Wad een beschermde status heeft. (H)
- Bij het aanleggen van een nieuwe waterkering voor de Afsluitdijk worden de cultuurhistorische waarden in grote mate niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. De openheid van het landschap rond de Afsluitdijk verandert door plaatsing van een nieuwe waterkering in de Waddenzee in lichte mate. (I)

<u>b. Kunstmatig rif</u>

Methode
Bij toepassing van kunstmatige riffen op het Wad worden voorgenoemde parallel aan het gehele dijklichaam geplaatst. Bij beiden neemt de golfoploop en –overslag af waardoor de hoogte van de Afsluitdijk zelf niet of in mindere mate verbeterd hoeft te worden.

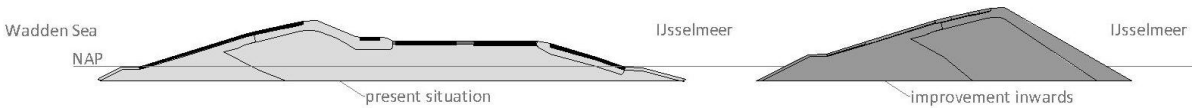
Algemene gegevens
- Kruinhoogte: 3 m +NAP (kunstmatig rif) (Rijkswaterstaat, 2006);
- Rifbreedte (op bodem): orde 20 m;
- Grondverzet: orde 100 m^3/m;
- Materiaalgebruik: zand, steenbekleding;
- Kosten (schatting): 284 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006).

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van kunstmatige riffen op het Wad zijn:
- Deze oplossing is robuust aangezien de Afsluitdijk aan de veiligheidsnormen voldoet en verdere verbetering (verhoging kunstmatige riffen) niet wordt geblokkeerd. Wel is de Afsluitdijk op lange termijn niet beschermd tegen overstromen. (A)
- Deze oplossing is technisch haalbaar, aangezien er ervaring is met deze methode en deze betrouwbaar is. (B)
- Indien er kunstmatige riffen voor de Afsluitdijk worden geplaatst, kan er met de stijgende zeewaterspiegel in de toekomst overloop ontstaan, waarbij zoutwater het IJsselmeer instroomt. Het gevolg kan zijn beperkte schutcapaciteit, dan wel het onbruikbaar zijn van rijksweg A7. Verder veroorzaakt deze oplossing hinder voor visserij en watersport. (C)
- Er is door zwaardere hydraulische randvoorwaarden een toenemende kans op overlopen van de Afsluitdijk. Hierbij kan instroom van zoutwater in het IJsselmeer optreden, wat een verhoogde zoutconcentratie bij de inlaatpunten oplevert. (D)
- Er zullen kunstmatige riffen in de Waddenzee worden aangelegd, wat veel werkzaamheden met zich meebrengt. (E)
- Om een nieuwe waterkering aan de buitenzijde aan te leggen bedragen de hoge investeringskosten naar schatting 284 miljoen euro (Rijkswaterstaat, 2006). (F)
- Gezien de aard van de oplossing zal realisatie hiervan langere tijd in beslag nemen. (G)
- Er kan (lichte) verzilting van het IJsselmeer optreden (overlopen van de Afsluitdijk) met eventueel negatieve gevolgen voor flora en fauna in het IJsselmeer. Verder wordt er een grondlichaam in de Waddenzee aangelegd, wat mogelijk een negatieve invloed op de flora en fauna zou kunnen hebben. Wel biedt deze oplossing ook nieuwe kans voor het creëren van een natuurvriendelijke

omgeving met dezelfde of betere kwaliteiten ten opzichte van de huidige situatie. Echter wordt verwacht dat de nadelen niet opwegen tegen de voordelen, bijvoorbeeld omdat het Wad een beschermde status heeft. (H)
- Bij het aanleggen van kunstmatige riffen voor de Afsluitdijk worden de cultuurhistorische waarden in grote mate niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. De openheid van het landschap rond de Afsluitdijk verandert door de aanleg van kunstmatige riffen in de Waddenzee in lichte mate. (I)

2. Binnenzijde

Methode
In het geval van een nieuwe waterkering aan de binnenzijde wordt een nieuwe dijk achter de Afsluitdijk aangelegd. Deze optie heeft veel overeenkomsten met de oplossingsrichting maatregelen achterland, met als hoofdzakelijke verschillen dat:
- bij deze methode een nieuwe waterkering wordt aangelegd in plaats van het huidige systeem van waterkeringen te verbeteren;
- het gebied tussen de Afsluitdijk en de nieuwe waterkering een (veel) kleiner oppervlak heeft dan bij de oplossingsrichting maatregelen achterland.



Figuur 3.19 Nieuwe waterkering binnenzijde

Algemene gegevens
- Kruinhoogte: 10 m +NAP;
- Dijkbreedte: orde 100 m;
- Grondverzet: orde 1.000 m^3/m;
- Materiaalgebruik: zand, steenbekleding;
- Kosten (schatting): orde miljard euro.

Voor- en nadelen
De voor- en nadelen van een nieuwe waterkering in het IJsselmeer zijn:
- Deze oplossing is technisch haalbaar, aangezien er ervaring is met deze methode en deze redelijk betrouwbaar is. (B)
- Er zal een geheel nieuwe waterkering in het IJsselmeer worden aangelegd, wat zeer veel werkzaamheden met zich meebrengt. (E)
- Om een nieuwe waterkering aan de binnenzijde aan te leggen bedragen de hoge investeringskosten naar schatting in de orde van een miljard euro. (F)
- Gezien de aard van de oplossing zal realisatie hiervan lange tijd in beslag nemen. (G)
- Bij het aanleggen van een nieuwe waterkering achter de Afsluitdijk worden de cultuurhistorische waarden in grote mate niet aangetast: de rechtlijnigheid, de karakteristieke taludhelling en het aanzicht van de Afsluitdijk veranderen niet. De openheid van het landschap rond de Afsluitdijk verandert door plaatsing van een nieuwe waterkering in het IJsselmeer in lichte mate. (I)

3.3.5 Combinaties
De besproken oplossingen kunnen ook gecombineerd worden, waarmee een eventuele optimalisatie haalbaar is door bijvoorbeeld het combineren van de voordelen van twee oplossingen. Eventuele combinaties zullen bij het creëren van de integrale oplossingen (hoofdstuk 8) worden meegenomen en worden daarom niet behandeld in dit hoofdstuk.

3.4 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn verschillende verbeteringsmaatregelen voor dijklichamen behandeld, zowel algemeen als voor de Afsluitdijk.

3.4.1 Algemeen

Als er een keuze gemaakt moet worden in de verbeteringsmaatregelen voor een dijklichaam (in het algemeen) is dit van vele factoren afhankelijk, zoals de faalmechanismen waarop een dijklichaam niet voldoet, de functie en inrichting van het achterliggende land, et cetera. De visie voor het omliggende gebied is hierbij ook van groot belang. Dit alles bepaalt of er überhaupt wel een verbetering aan het dijklichaam nodig is, of dat het beter is (elders) een nieuwe waterkering te plaatsen.
In het algemeen kan vastgesteld worden dat oplossingsrichtingen op basis van een grondconstructie vaak de voorkeur genieten aangezien dit meestal robuuste oplossingsrichtingen betreffen en in de toekomst goed aanpasbaar blijken te zijn. Oplossingsrichtingen met een waterkerende constructie (muren, damwanden) zijn in het algemeen vaak alleen geschikt voor het tegenhouden van golfoploop en –overslag, van tijdelijke aard en moeilijk aanpasbaar.

3.4.2 Afsluitdijk

Als de situatie van de Afsluitdijk wordt bekeken blijkt het lastig aan te geven wat de beste verbeteringsmaatregelen zijn voor de Afsluitdijk. Dit is namelijk deels afhankelijk van de (politieke) visie voor het omliggende gebied (bijvoorbeeld aanvallen, verdedigen of terugtrekken). In dit onderzoek zijn alleen verbeteringsmaatregelen bekeken voor de Afsluitdijk en het achterliggende gebied waar de dijk invloed op uitoefent (IJsselmeer). Belangrijke criteria zijn bijvoorbeeld het wel of niet toestaan dat de Afsluitdijk tijdelijk niet toegankelijk is voor verkeer, toestaan van zoutwater in het IJsselmeer.

Vastgesteld kan worden dat variant 0 (nulsituatie Afsluitdijk), het behouden van de huidige situatie, geen optie is. Bij behoud van de huidige situatie voldoet de kruinhoogte niet aan de wettelijke veiligheidsnormen wat een te grote hoeveelheid golfoverslag tot gevolg kan hebben. De grasbekleding van de kruin en het binnentalud voldoet hierbij niet aan de veiligheidsnormen. De kans op falen of bezwijken van de Afsluitdijk (met de kans op zoutwater in het IJsselmeer tot gevolg) en achterliggende waterkeringen, neemt hierdoor toe en de gebruiksfuncties (peilbeheer IJsselmeer en verkeersfunctie) kunnen verstoord worden.
Het verbeteren van de achterliggende waterkeringen heeft dezelfde gevolgen als bij het behouden van de huidige situatie, echter is de veiligheid van het achterland gegarandeerd door beschermende maatregelen tegen overstromen voor de achterliggende waterkeringen.
Bij beide oplossingsrichtingen is veiligheid van de Afsluitdijk in het geding waardoor variant 0 niet als optie kan worden gezien.

Nagenoeg alle oplossingsrichtingen binnen variant 1 (aanpassen Afsluitdijk) zijn een optie voor verbetering van de Afsluitdijk, waarbij enkele oplossingsrichtingen alleen toepasbaar zijn onder bepaalde randvoorwaarden. Een overslagbestendige Afsluitdijk is alleen mogelijk als wordt toegestaan dat er (een toenemende) kans op overlopen en golfoverslag (met als gevolg zoutwater in het IJsselmeer) is en de Afsluitdijk hierbij voor verkeer afgesloten mag worden. Een waterkerende constructie in de vorm van een muur is geen optie aangezien deze in het algemeen vaak alleen geschikt zijn voor het tegenhouden van golfoploop en – overslag. Verder geldt voor waterkerende constructies dat deze vaak van tijdelijke aard en moeilijk aanpasbaar zijn. Een dijkverhoging over een oude dijk, verbetering buiten- en binnenwaarts zijn mogelijke opties, waarbij de Afsluitdijk aan de veiligheidsnormen voldoet en de kans op overlopen en golfoverslag vrij klein is (behalve bij beperking van de golfoploop zonder toepassing van een kruinverhoging).

Variant 2 (plaatsen nieuwe waterkering) is een optie, echter is het plaatsen van een nieuwe waterkering niet noodzakelijk aangezien met (geringe) verbeteringen aan de Afsluitdijk voldaan kan worden aan de veiligheidsnormen. Tevens is het plaatsen van een nieuwe waterkering zeer kostbaar en zal er, bij het plaatsen van een nieuwe waterkering in de Waddenzee, een studie benodigd zijn om de gevolgen met betrekking tot bijvoorbeeld de morfologie en flora en fauna van de Waddenzee in kaart te brengen. De toepassing van kunstmatige riffen daarentegen is een reëlere optie aangezien kunstmatige riffen minder uitwerking hebben op de Waddenzee en het een minder kostbare optie is.

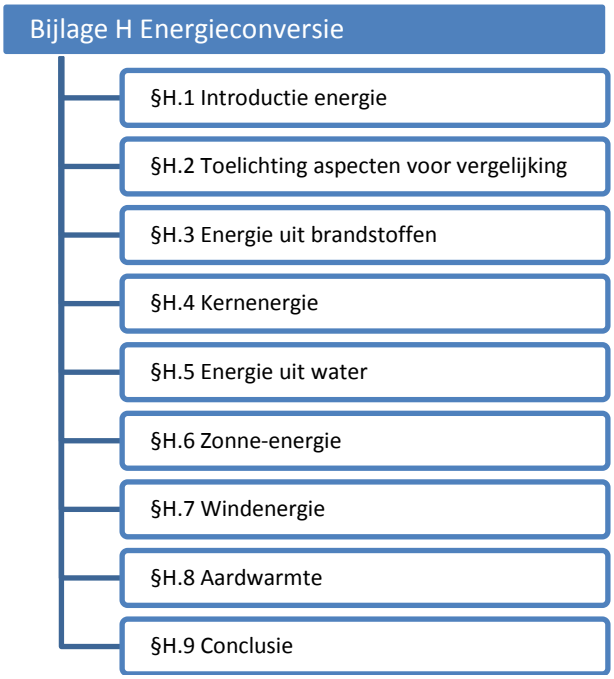
Voorgaande conclusie is, samen met enkele andere kenmerken, in Tabel 3.1 beknopt weergegeven.

Tabel 3.1 Overzicht conclusie verbeteringsmaatregelen

§	no.	variant/ oplossingsrichting/ oplossing/ optie	verbreding dijk (m)	grondverzet (m^3/m)	kosten 10^6 (€)	optie (ja/nee)
3.3.2		**variant 0: nulsituatie Afsluitdijk**				
	1	**geen verbeteringen**	0	0	0	nee
	2	**maatregelen achterland**	0	0	115	nee
3.3.3		**variant 1: aanpassen Afsluitdijk**				
		verbetering binnen bestaande grenzen dwarsprofiel				
	1	overslagbestendige dijk	0	0	77	ja
	2	**waterkerende constructie met grondconstructie**				
	2.a	*muren*	0	0	225	nee
	2.b.	*damwanden, diepwanden en kistdammen*	0	0	225	ja
	3	dijk over oude dijk	0	300[1]	369[1]	ja
		verbetering buiten bestaande grenzen dwarsprofiel				
	1	buitenwaarts				
	1.a	*grondlichaam*	20	230	391	ja
	1.b	*beperking golfoploop*	20/0/50	230/0/200[1]	O(10)[1]	ja
	2	binnenwaarts				
	2.a	*grondlichaam*	20	235	369	ja
3.3.4		**variant 2: plaatsen nieuwe waterkering**				
	1	**buitenzijde**				
	1.a	waterkering	O(100)[1]	O(1000)[1]	O(1000)[1]	nee
	1.b	kunstmatige riffen	O(20)[1]	O(100)[1]	284	ja
	2	**binnenzijde**	O(100)[1]	O(1000)[1]	O(1000)[1]	nee

[1]: geschatte waarden

4 Energieconversie



Figuur 4.1 Indeling appendix H

4.1 Inleiding

Energie is een hippe term tegenwoordig: overheid en bedrijven houden zich ermee bezig en het onderwerp gaat ook veel burgers aan. Er wordt gekeken hoe energie voor de mens in een nuttige vorm kan worden omgezet waarbij geen brandstoffen worden gebruikt of brandstoffen op een schone manier en op (korte) termijn worden geproduceerd. Verder wordt gezocht naar methoden waarbij weinig tot geen emissies zijn. Echter mogen de kosten ook weer niet te hoog zijn. De huidige olieprijs van ongeveer $ 110,- geeft veel mogelijkheden voor het zoeken naar schone(re) en duurzame alternatieven die kunnen concurreren met fossiele brandstoffen.
In Nederland wordt in allerlei kleine en grote projecten aandacht besteedt aan het winnen van energie uit verschillende bronnen. Verder wordt er gekeken naar het gebruik en hoe dit verminderd kan worden.

In dit hoofdstuk zullen de verschillende methoden voor het opwekken van elektriciteit worden beschouwd. Het doel van deze beschouwing is het verkrijgen van een overzicht waaruit valt op te maken hoe de verschillende methoden van elektriciteitsproductie zich tot elkaar verhouden en wat de mogelijkheden zijn in combinatie met de Afsluitdijk.

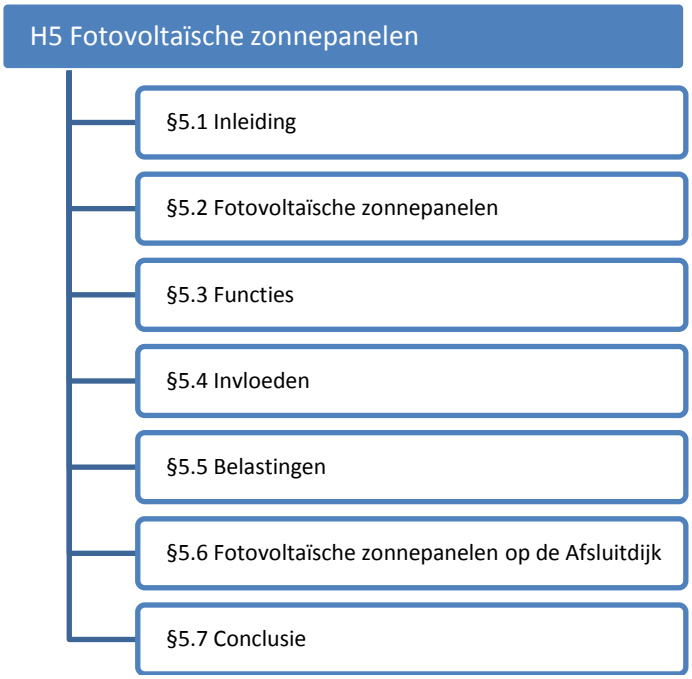
Door het schrijven van dit hoofdstuk wordt getracht om, voor zowel de lezer als de auteur van dit rapport, een duidelijk beeld over energie en de conversiesystemen voor elektriciteit te schetsen. Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende methoden van energieconversie zal eerst een introductie van het begrip energie worden gegeven. Een aantal foutief gebruikte termen worden besproken, het begrip duurzame energie wordt verhelderd en de ordegroottes van elektriciteitsverbruikers worden weergegeven.
Daarna zullen de verschillende methoden voor de productie van elektriciteit worden behandeld. Er zal worden gekeken naar de huidige en mogelijk toekomstige methoden voor de productie van elektriciteit. Per methode zullen onder andere het principe, enkele kengetallen, de toepasbaarheid voor de Afsluitdijk en de voor- en nadelen worden behandeld.

In paragraaf 4.2 wordt een samenvatting van dit onderzoek weergegeven; een volledige versie is te vinden in appendix I.

4.2 Samenvatting

In deze paragraaf zullen een samenvatting en de conclusies van appendix I worden gegeven.

5 Fotovoltaïsche zonnepanelen



Figuur 5.1 Indeling hoofdstuk 5

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden, onafhankelijk van de gekozen oplossing voor verhoging van de veiligheid van de Afsluitdijk, de mogelijkheden voor het plaatsen van fotovoltaïsche zonnepanelen (verder aangeduid als zonnepanelen) op een dijk geanalyseerd. Eerst wordt de opbouw van zonnepanelen en de mogelijke typen bevestigingen voor zonnepanelen bekeken (paragraaf 5.2). Daarna wordt bekeken of, en zo ja, welke functie(s) zonnepanelen kunnen innemen bij plaatsing op een dijk, waarna de wisselwerking tussen zonnepanelen en een dijk wordt beschouwd (paragraaf 5.3). Vervolgens worden de invloeden een dijk en zonnepanelen op elkaar bekeken (paragraaf 5.4), de belastingen worden vastgesteld (paragraaf 5.5). Tot slot wordt de Afsluitdijk op alle voorgenoemde aspecten bekeken, waaruit diverse mogelijkheden voor plaatsing van zonnepanelen op de Afsluitdijk volgen (paragraaf 5.6). Tot slot wordt de conclusie van dit hoofdstuk weergegeven (paragraaf 5.7).

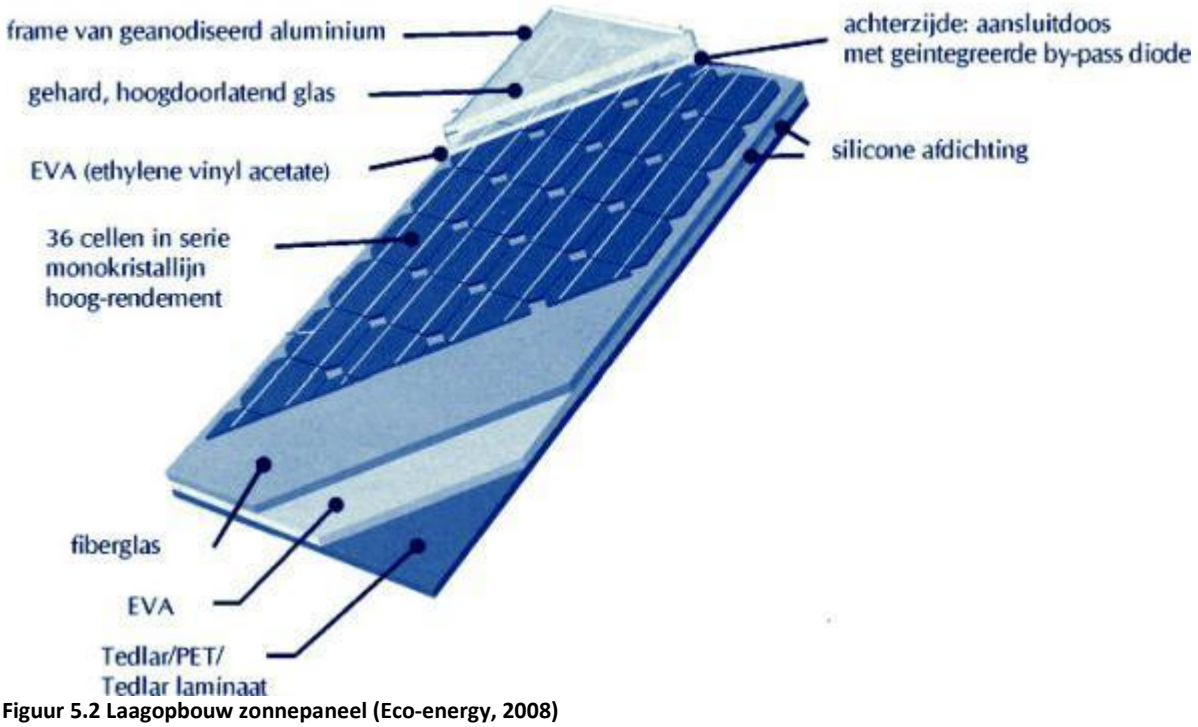
5.2 Zonnepanelen

In appendix I is er al enige aandacht besteed aan zonnepanelen en de werking ervan. In deze paragraaf wordt de opbouw (lagen) van zonnepanelen nader bekeken met tot doel het vaststellen van de mogelijkheden voor het leveren van een bijdrage aan de waterkerende functie van een dijklichaam. Verder zullen constructies voor het plaatsen van zonnepanelen worden geanalyseerd.

5.2.1 Opbouw zonnepanelen

Er zijn verschillende typen zonnepanelen maar er kan grofweg gesteld worden dat een zonnepaneel aan de voorzijde bestaat uit een glasplaat of polycarbonaatfolie. Het glas is thermisch gehard en heeft een laag ijzergehalte om zoveel mogelijk licht door te laten. Het glas is water- en dampdicht, kras- en hagelbestendig en zelfreinigend bij regen. De achterzijde bestaat uit weer een laag glas (semi-transparante modules) of een water- en dampdichte folie (dichte standaardmodules) om het gewicht van de module lager te kunnen houden. Tussen de voor- en achterzijde worden de zonnecellen geplaatst. Bij de semi-transparante modules worden de zonnecellen met een speciaal hars ingegoten en bij de dichte standaardmodules worden de zonnecellen met een vochtbestendige

kunststof beschermd tegen weersinvloeden. Dit geheel wordt een laminaat genoemd. Het laminaat wordt voor de bevestiging vaak opgesloten in een aluminium kader. Op de achterzijde van de module is een waterdichte aansluitdoos voor de elektrische kabelverbindingen geplaatst. Zie Figuur 5.2 voor de laagopbouw van een zonnepaneel.



Figuur 5.2 Laagopbouw zonnepaneel (Eco-energy, 2008)

5.2.2 Bevestiging

Zonnepanelen worden vaak op daken en aan gevels van gebouwen geplaatst, waarbij zonnepanelen vaak met eenvoudige middelen aan een gebouw kunnen worden bevestigd. Voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijk zijn er minder goede bevestigingsmogelijkheden. Er zal daarom naar andere bevestigingsmogelijkheden gezocht moeten worden.

Het verschil met het plaatsen van zonnepanelen op bijvoorbeeld een gebouw is dat er bij het plaatsen van zonnepanelen op een dijk zwaardere omstandigheden van toepassing zijn (dit zal worden besproken in paragraaf 5.5). De constructie waarmee zonnepanelen aan een dijk bevestigd zullen worden dient daarom bestand te zijn tegen deze zwaardere omstandigheden. De locaties waar zonnepanelen normaliter geplaatst worden zijn: daken en gevels van gebouwen, het maaiveld, op palen (bij bijvoorbeeld een klein gemaal), geluidsschermen, et cetera. Zoals besproken in paragraaf 5.2.1 heeft een zonnepaneel meestal een aluminium kader. Dit kader wordt gebruikt ter bevestiging van een zonnepaneel aan een constructie die bijvoorbeeld op een dak van een gebouw bevestigd is. De constructiematerialen waarmee zonnepanelen bevestigd worden zijn vaak van aluminium of staal. Beton en kunststoffen behoren ook tot de mogelijkheden. In Figuur 5.3 is schematisch een voorbeeld van een bevestigingssysteem weergegeven.



Figuur 5.3 Voorbeeld bevestigingsconstructie zonnepanelen

5.3 Functies

Zoals besproken in paragraaf 2.2.1 kan een dijk kan een of meerdere functies vervullen. Zonnepanelen kunnen hier extra functies aan toevoegen, of bestaande functies versterken. De meest relevante functies met daarbij de mogelijke invloeden van zonnepanelen op deze functies zijn:

1. Waterkering
   Zonnepanelen zijn opgebouwd uit glazen platen met daartussen een of meerdere lagen die zonne-energie omzetten in elektrische energie, met om dit geheel een metalen omlijsting. Met betrekking tot de waterkerende functie van een dijk kunnen zonnepanelen de volgende functies vervullen:
   a. Dijkbekleding: een dijkbekleding dient er voor te zorgen dat een dijk erosiebestendig is. Een constructie met zonnepanelen zou een bijdrage kunnen leveren aan deze functie, aangezien de buitenzijde van zonnepanelen (bovenste laag) van glas is en daardoor beschouwd kan worden als een erosiebestendig materiaal.
   b. Waterkerend element: waterkerende elementen dienen bijvoorbeeld overloop en overslag te voorkomen. Een constructie met zonnepanelen zou een bijdrage kunnen leveren aan deze functie, er kan bij een ontwerp ook getracht worden zonnepanelen te laten functioneren als waterkerend element.
2. Duurzame energieomzetter: hierbij zorgen zonnepanelen voor het opwekken van duurzame energie, dit is de functie waar zonnepanelen oorspronkelijk voor bedoeld zijn.
   Zonnepanelen worden gemaakt om zonnestraling om te zetten in elektriciteit, daarnaast kunnen aan zonnepanelen ook andere functies worden gegeven, of kunnen deze de functie(s) van een dijk.

Voor de overige functies (verkeersverbinding, constructie tegen verzilting, behoud zoetwater voor veeteelt en landbouw, et cetera) wordt aangenomen dat zonnepanelen hier geen bijdrage aan kunnen leveren. Deze functies zullen dan ook niet verder worden beschouwd.

5.4 Invloeden

Het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam kan invloed hebben op de verschillende functies van een dijklichaam. Andersom kan het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam ook invloed hebben op het functioneren van zonnepanelen. Om een beter beeld te krijgen van de invloed van het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam wordt dit hieronder nader beschouwd.

5.4.1 Invloeden van zonnepanelen

Hieronder worden de invloeden ten gevolge van het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam besproken.

Wegnemen van zonlicht
Afhankelijk van de locatie waar zonnepanelen geplaatst worden op een dijklichaam kan er invloed zijn op de huidige dijkbekleding. Een voorbeeld hiervan is het wegnemen van het zonlicht van een grasmat, wat mogelijk kan leiden tot een slechte kwaliteit dijkbekleding. Bij het maken van een integraal ontwerp dient hiermee rekening te worden gehouden door bijvoorbeeld te kiezen voor een ander type dijkbekleding.

Reflectie van zonlicht
Het is bij zonnepanelen de bedoeling dat er zoveel mogelijk licht 'opgenomen' wordt en zo min mogelijk licht gereflecteerd wordt. Echter is de bovenlaag van een zonnepaneel van glas en kan zonlicht reflecteren. Door reflectie van zonlicht via zonnepanelen zou er mogelijk hinder voor het wegverkeer (indien aanwezig) kunnen ontstaan. Dit is afhankelijk van de locatie en de stand van de zonnepanelen. Om te voorkomen dat het verkeer hinder ondervindt van reflecterend zonlicht zijn randvoorwaarden voor de bepaalde locaties en de helling van de zonnepanelen benodigd.

Afvoer van water
Zonnepanelen bestaan onder andere uit glas en vormen hiermee een gesloten constructie waardoor bijvoorbeeld overslaand water moeilijker kan infiltreren en zich kan concentreren op bepaalde plaatsen. Indien zonnepanelen worden geplaatst op een dijklichaam dient hiermee rekening gehouden te worden zodat deze plaatsen beter beschermd kunnen worden tegen erosie.

5.4.2 Invloeden op zonnepanelen
Hieronder worden de mogelijke invloeden op zonnepanelen besproken.

Zoutwater omstandigheden
In het geval van overslaand water kunnen zonnepanelen in contact komen met zoutwater (afhankelijk van de locatie van plaatsing van fotovoltaïsche zonnepanelen). In theorie zouden zonnepanelen hiertegen bestand moeten zijn vanwege de 'waterdichtheid' van zonnepanelen. Het defect raken van zonnepanelen kan worden voorkomen door deze alleen te plaatsen op locaties waar de kans gering is dat deze volledig onder water kunnen komen te staan.

Vandalisme
Een geheel andere invloed is vandalisme. Voorbeelden zijn diefstal, of het beschadigen van zonnepanelen, of het aanbrengen van graffiti. Er kan niet op voorhand tegen alle vormen vandalisme worden beschermd, echter dient het ontwerp dusdanig te zijn dat diefstal van zonnepanelen zoveel mogelijk bemoeilijkt wordt. Dit kan doordat bijvoorbeeld een grote hoeveelheid handelingen of groot materieel nodig is voor het verwijderen van zonnepanelen. Echter dienen de werkzaamheden voor vervanging van zonnepanelen op eenvoudige wijze gedaan te kunnen worden. Groter materieel geniet hierbij de voorkeur, aangezien dit eenvoudige vervanging mogelijk maakt en toch zorgt dat zonnepanelen voldoende beschermd zijn tegen diefstal.

5.5 Belastingen

Als zonnepanelen op een dijk worden geplaatst zullen deze (afhankelijk van de locatie op de dijk) weerstand moeten kunnen bieden tegen diverse belastingen. Per belasting wordt bekeken wat de gevolgen kunnen zijn.

Hydraulische belastingen:
- Water
  Als zonnepanelen op een deel van de dijk worden geplaatst waar de kans aanwezig is dat deze onder water komen te staan, kunnen zonnepanelen defect raken door bijvoorbeeld de aanwezige waterkolom boven het zonnepaneel. Als defecten voorkomen dienen te worden zal er bij het maken van een integraal ontwerp rekening mee gehouden dienen te worden.

Bijvoorbeeld door een zonnepaneel met andere afmetingen te kiezen dat beter bestand is tegen een bepaalde belasting, of door een andere locatie te kiezen.

- Golven
  Als de zonnepanelen mogelijk directe belasting van golven kunnen ondervinden, dient hier bij het maken van een integraal ontwerp rekening mee te worden gehouden. Dit kan beïnvloed worden door bijvoorbeeld zonnepanelen hoger boven het buitentalud te plaatsen, of door een zonnepaneel met andere afmetingen te kiezen dat beter bestand is tegen een bepaalde belasting, of door een andere locatie te kiezen.

Overige belastingen:

- Wind
  Aangezien een dijk vaak in een wijds gebied ligt kunnen zonnepanelen op een dijk te maken krijgen met een hoge windbelasting. Dit kan een directe windbelasting zijn, maar ook een indirecte windbelasting bijvoorbeeld zuiging ten gevolge van wind die over een kruin heen waait (bij plaatsing van zonnepanelen op het binnentalud). De belasting ten gevolge van wind wordt vastgesteld in appendix P.
- Neerslag (sneeuw)
  Een andere belasting waarmee rekening gehouden dient te worden is de belasting ten gevolge van neerslag en dan in het bijzonder sneeuw. De belasting ten gevolge van sneeuw wordt vastgesteld in appendix P.
- IJs
  Het is mogelijk dat kruiend ijs op kan treden, met grote krachten op de dijk(bekleding) tot gevolg. Zonnepanelen zijn kwetsbare elementen die bij belasting met kruiend ijs mogelijk beschadigd kunnen raken. Bij het ontwerp zal hiermee rekening worden gehouden door een locatie in het dwarsprofiel te kiezen waarbij de kans op belasting ten gevolge kruiend ijs klein is.

5.6 Fotovoltaïsche zonnepanelen op de Afsluitdijk

In de voorgaande paragrafen zijn de functies, locaties, invloeden, belastingen en constructies voor zonnepanelen besproken. In deze paragraaf komen enkele van deze onderwerpen weer aan de orde, echter nu alleen toegespitst op de situatie voor de Afsluitdijk. Alleen de onderwerpen waarvoor toelichting specifiek voor de Afsluitdijk benodigd is worden hieronder behandeld.

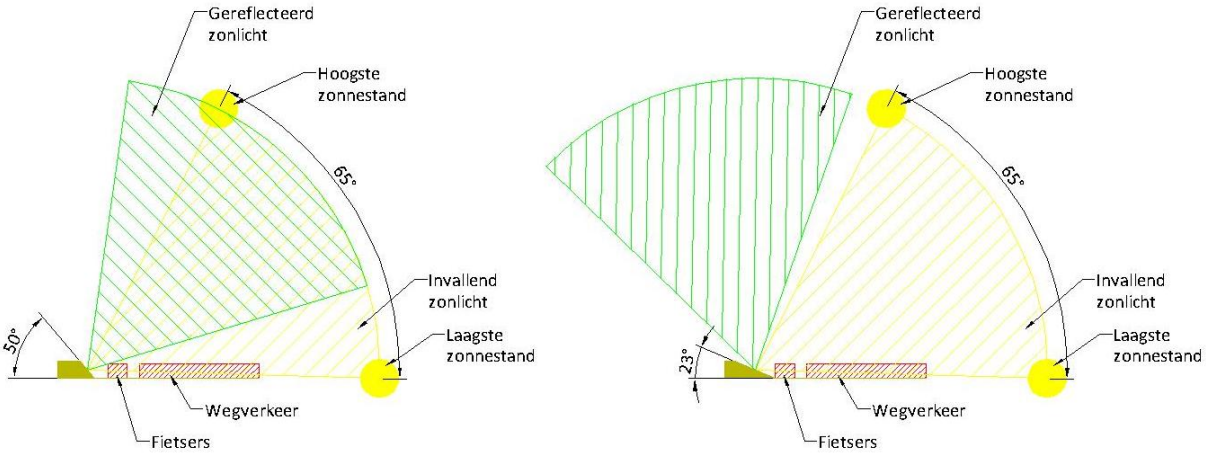
5.6.1 Wegnemen van zonlicht

Afhankelijk van de locatie waar zonnepanelen geplaatst worden op de Afsluitdijk kan er invloed zijn op de huidige dijkbekleding. Bij plaatsing van zonnepanelen op de kruin of het binnentalud vormt dit een probleem aangezien de dijkbekleding hier bestaat uit een grasmat. In dat geval zal (een deel van) de huidige grasbekleding vervangen dienen te worden door een ander type bekleding dat niet afhankelijk is van zonlicht. Op overige locaties worden geen problemen verwacht.

5.6.2 Reflectie van zonlicht

Eerst wordt bekeken op welke locaties er invloed van reflecterend zonlicht op het verkeer kan zijn. Daarna zal aangegeven worden bij welke uiterste standen (hellingen) van de zonnepanelen er hinder van zonlicht is voor het verkeer bij totale reflectie.
Het verkeer bevindt zich op de binnenberm tussen het onderste en het bovenste deel van het binnentalud. Er zal daarom alleen hinder voor het verkeer op kunnen treden als er zonnepanelen op de kruin of het binnentalud geplaatst worden.
In Figuur 5.4 zijn voor twee situaties de gebieden aangegeven die hinder kunnen ondervinden van mogelijke reflectie van zonlicht. Het linkerdeel geeft de reflectie bij de maximale helling van de zonnepanelen weer ($\alpha = 50°$). Het rechterdeel geeft de reflectie weer bij de huidige helling van het binnentalud ($\alpha \approx 23°$). In de figuur geeft het gele gebied de invalshoek van het zonlicht aan, welke ligt tussen $\alpha = 0°$ (zon aan de horizon) en $\alpha = 65°$ (enkele graden boven de maximale stand van de

zon in de zomer). Het rode gebied geeft aan waar het verkeer zich bevindt (fietsers en wegverkeer). Het groene gebied geeft, op basis van 'hoek van inval is hoek van terugkaatsing', het gebied met het gereflecteerde zonlicht aan. Indien hinder voor zowel het fiets- als het wegverkeer ten gevolge van gereflecteerd zonlicht voorkomen dient te worden mag het groene gebied geen overlap hebben met het rode gebied. Hieruit volgt dat de helling van de zonnepanelen niet liggen in het volgende gebied: $50° \le \alpha \le 90°$.



Figuur 5.4 Reflectie van zonlicht via zonnepanelen (links: de maximale helling; rechts: de huidige helling)

Verder dient nog vermeld te worden dat er op dit moment al hinder is voor het verkeer door reflectie van zonlicht via het water van het IJsselmeer.

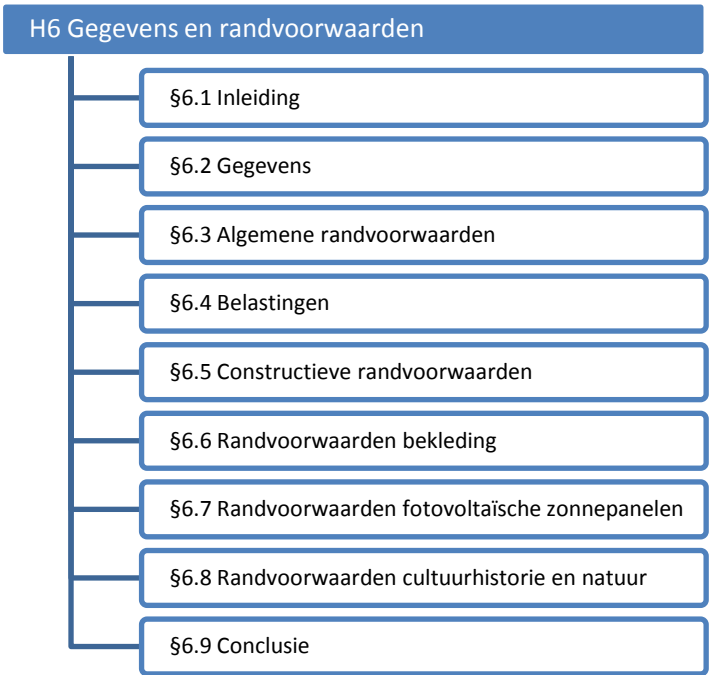
5.6.3 Afvoer van water

De huidige bekleding van de Afsluitdijk is grotendeels opgebouwd uit open materialen zoals stortsteen, basaltblokken en gras. Zonnepanelen bestaan onder andere uit glas en vormen hiermee een gesloten constructie waardoor bijvoorbeeld overslaand water moeilijker kan infiltreren. Indien zonnepanelen worden geplaatst op de Afsluitdijk dient bij het ontwerp rekening te worden gehouden met de mogelijkheid voor voldoende infiltratie van water en/of een systeem waarmee water afgevoerd kan worden.

5.7 Conclusie

Tekst voor deze paragraaf volgt nog…

6 Gegevens en randvoorwaarden



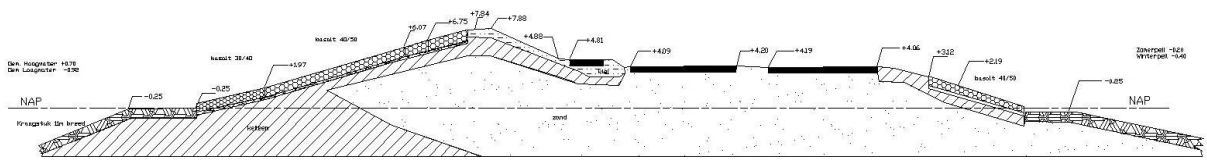
Figuur 6.1 Indeling hoofdstuk 6

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de randvoorwaarden worden vastgesteld waarmee bij het ontwerpen of aanpassen van een waterkering, die niet meer voldoet aan de veiligheidsnormen, rekening gehouden dient te worden om de veiligheid van het achterland te kunnen blijven garanderen. Aangezien voor iedere situatie de randvoorwaarden verschillend zijn, zullen alleen de benodigde randvoorwaarden voor de Afsluitdijk worden behandeld. Allereerst zullen de geometrie en diverse andere gegevens van de Afsluitdijk worden behandeld (paragraaf 6.2). Vervolgens zullen de randvoorwaarden aan bod komen (paragraaf 6.3 tot en met paragraaf 6.8), waarna het hoofdstuk afgesloten zal worden met een conclusie (paragraaf 6.9).

6.2 Gegevens

In deze paragraaf zullen gegevens van de Afsluitdijk worden weergegeven. Dit zijn gegevens van geometrie, peilen, materialen, et cetera Het doel is een overzicht van de gegevens van de Afsluitdijk te geven, welke benodigd zijn bij de uit te voeren berekeningen. Om een overzicht te verkrijgen is in Figuur 6.2 het gemiddelde dwarsprofiel van de Afsluitdijk weergegeven.



Figuur 6.2 Dwarsprofiel van de Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2006)

6.2.1 Geometrie

De gegevens van de geometrie van de Afsluitdijk zijn in appendix K weergegeven.

6.2.2 Ligging Afsluitdijk
De berekening van de hoeken van de as van de Afsluitdijk ten opzichte van het noorden zijn weergegeven in appendix L.

6.2.3 Bodemopbouw Afsluitdijk
De gegevens met betrekking tot de bodemopbouw van de Afsluitdijk zijn in appendix M weergegeven.

6.2.4 Peilen en getijdengegevens
De gegevens met betrekking tot de peilen van het IJsselmeer en de getijde gegevens van de Waddenzee zijn weer gegeven in appendix N.

6.2.5 Materialen
De materialen waar de Afsluitdijk uit is opgebouwd zijn zand, keileem, klei, rijshout, riet, stortsteen, basaltblokken, gras en asfalt. De materialen waarvan gegevens bekend zijn, worden hieronder meer in detail besproken. Indien waarden worden genoemd betreft het waarden voor het gemiddelde dwarsprofiel van de Afsluitdijk. Zie Figuur 6.2 voor de locatie van de materialen waarmee de dijk is opgebouwd.
De materialen die in het dijklichaam van de Afsluitdijk zijn toegepast zijn:

- Keileem
  De buitenberm en taludbekleding zijn opgebouwd met keileem. Het keileem is bij de aanleg van de Afsluitdijk op de bodem van de voormalige Zuiderzee aangebracht tot een hoogte van ongeveer 3 m+NAP (na aanbrengen van beteugelingsdammen en rijshout). Verder is keileem gebruikt ter bescherming van het zandlichaam aan de IJsselmeerzijde (vanaf -1 m+NAP) met een laagdikte van ongeveer 0,75 m en aan de Waddenzeezijde (tot 5,5 m+NAP) met een laagdikte van 1 m. De soortelijke massa van het gebruikte keileem is 1.850 kg/m^3 (droog) en 2.080 kg/m^3 (nat).
- Zand
  De kern van de Afsluitdijk bestaat uit zand waarvan de bovenkant (ter plaatse van de wegen) ligt op een hoogte van ongeveer 4 m+NAP. De soortelijke massa van het zand is 1.750 kg/m^3 (droog) en 1.850 kg/m^3 (nat).
- Klei
  De bekleding van de dijk bestaat onder andere uit klei (met daarop basaltblokken) met een laagdikte van ongeveer 1,5 m. De soortelijke massa van de klei is 1.530 kg/m^3 (droog) en 1.730 kg/m^3 (nat).
- Stortsteen
  Ter plaatse van de bermen aan zowel de Waddenzeezijde als de IJsselmeerzijde is een laag stortsteen aangebracht. De gradatie en de soortelijke massa zijn onbekend.
- Basaltblokken
  Aan de buitenzijde zijn (op een puinlaag) basaltblokken geplaatst. De afmetingen van het basalt zijn 30/40 voor het onderste deel van het boven water talud aan de Waddenzeezijde en 40/50 voor het bovenste deel van het boven water talud aan de Waddenzeezijde en IJsselmeerzijde. De soortelijke massa bedraagt 2.900 kg/m^3.
- Betonnen bekledingselementen
  Verder zijn er nog betonnen bekledingselementen aanwezig. De afmetingen hiervan zijn onbekend en de soortelijke massa is 2.300 kg/m^3.
- Gras
  Op de kruin en het binnentalud is een grasbekleding aanwezig.
- Asfalt
  Ter plaatse van rijksweg A7 en het fietspad is asfalt aanwezig.

Zie appendix M voor een overzicht van de grondgegevens van de Afsluitdijk.

6.3 Algemene randvoorwaarden

Ten eerste worden enkele algemene randvoorwaarden gegeven:

- De huidige functies van de Afsluitdijk dienen behouden te worden en waar mogelijk verbeterd;
- De planperiode waarbij de verbeteringsmaatregelen dienen te voldoen aan de eisen, loopt tot en met het jaar 2050;
- Er dient ontworpen te worden volgens de vigerende Leidraden, Technische Rapporten en de huidige wet- en regelgeving omtrent de veiligheid van waterkeringen;
- De Afsluitdijk dient te voldoen aan de eisen uit de Wet op de waterkering. Het betreft een primaire waterkering categorie b, met een normfrequentie van 1/10.000 per jaar;
- Het water van de Waddenzee dient gekeerd te worden (ten bate van de veiligheid van het achterland);
- Het water van het IJsselmeer dient gekeerd en tevens gespuid te kunnen worden (ten bate van handhaving van het peil);
- Het streefpeil van het IJsselmeer mag niet worden beïnvloed;
- De spuicapaciteit in de Afsluitdijk mag niet afnemen ten opzichte van de huidige situatie;
- Spuien is alleen mogelijk als de waterstand van de Waddenzee minstens 0,10 m lager is dan die van het IJsselmeer;
- Voor de soortelijke massa van zoetwater (ρ_w) wordt 1.000 kg/m^3 en voor de soortelijke massa van zoutwater (ρ_w) wordt 1.025 kg/m^3 aangehouden;

6.4 Belastingen

In deze paragraaf worden de randvoorwaarden voor de belasting van de Afsluitdijk besproken.

6.4.1 Dijklichaam

Permanente belastingen

De stabiliteit van de Afsluitdijk dient te allen tijde gelijk te blijven of verbeterd te worden.

- Eigen gewicht en gronddruk
  De benodigde waarden voor de belasting ten gevolge van het eigen gewicht en de gronddruk zijn gegeven in paragraaf 6.2.5;
- Onttrekkingen uit de grond
  De bodemdaling ten gevolge van onttrekkingen uit de grond is vastgesteld op h_{bd} = 0,10 m.

Veranderlijke belastingen

Hieronder worden de hydraulische belastingen (randvoorwaarden) en overige veranderlijke belastingen behandeld.

Hydraulische randvoorwaarden

Om er voor te zorgen dat een te ontwerpen waterkering of een waterkering met het toetsoordeel ´voldoet niet´ (weer) aan de veiligheidsnormen voldoet, zijn hydraulische randvoorwaarden nodig. Dit zijn randvoorwaarden die een verzameling statistische beschrijvingen van de hydraulische bedreigingen zoals rivierafvoeren, waterstanden op zee, waterstanden op het IJsselmeer, windgolven, deining, bui/oscillaties en buistoten bevatten.
Voor hydraulische randvoorwaarden kan er onderscheid worden gemaakt in toetsrandvoorwaarden en ontwerprandvoorwaarden. Het verschil tussen deze twee typen randvoorwaarden ligt in de toepassing ervan:

- toetsrandvoorwaarden mogen alleen worden gebruikt bij toetsing van de waterkering in de periode waarvoor deze zijn vastgesteld;
- ontwerprandvoorwaarden worden gebruikt bij het (opnieuw) ontwerpen van een (bestaande) waterkering.

Opmerking: randvoorwaarden voor de kunstwerken in de Afsluitdijk worden niet behandeld, aangezien bij dit onderzoek alleen mogelijkheden worden bekeken voor het verbeteren van het dijklichaam en niet voor de kunstwerken.

Er is gekozen voor een deterministische aanpak (i.p.v. een geavanceerde aanpak, zoals de inundatiekans of –risicobenadering) voor het maken van een ontwerp, waardoor het voldoende is te beschikken over de Maatgevende Hoog Waterstand (MHW, ofwel het ontwerppeil) en daarbij behorende representatieve golfgegevens (golfhoogte en golfperiode).
De hydraulische randvoorwaarden zijn weergegeven in de 'Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen 2006', echter zijn dit randvoorwaarden die alleen gebruikt mogen worden bij toetsing van een primaire waterkering en niet bij het maken van een dijkontwerp.

Op dit moment bestaat er een rekenmodel voor golfvorming op de Waddenzee, echter is dit niet in staat de golven tegen dijken goed te voorspellen. Er zijn daardoor op dit moment dan ook nog geen betrouwbare hydraulische randvoorwaarden voor de Waddenzee beschikbaar. Er zullen metingen worden uitgevoerd om het rekenmodel te kunnen verbeteren (project 'Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW)').
Verder zijn er hydraulische randvoorwaarden vastgesteld voor de planstudie 'Extra Spuicapaciteit en Ecologische Samenhang langs de Afsluitdijk' ('[ES]2-Afsluitdijk'). Dit zijn hydraulische randvoorwaarden voor de Afsluitdijk met de volgende kenmerken:

- De randvoorwaarden zijn gebaseerd op een veiligheidsnorm 1/10.000;
- De randvoorwaarden zijn geldend voor het jaar 2100;
- De randvoorwaarden behoren bij klimaatscenario 'G+' of 'W+';
- De randvoorwaarden gelden ter hoogte van de knik in de Afsluitdijk, 1.000 m uit buitenkruinlijn van de Afsluitdijk.

Voordat toepassing van de hydraulische randvoorwaarden van de planstudie '[ES]2-Afsluitdijk' plaatsvindt, wordt bekeken of deze randvoorwaarden ook voor het overige deel van de Afsluitdijk mogen worden gebruikt. De aandachtspunten zijn hierbij:

- Locatie
  De locatie bij de Afsluitdijk is van invloed op de hydraulische randvoorwaarden. Zo zullen de golven ter plaatse van het traject Kornwerderzand – Zurich andere parameters hebben dan voor het overige deel van de Afsluitdijk van toepassing is vanwege de knik in de Afsluitdijk en de 'voorgeschiedenis' van de golven (geulen, ondieptes, et cetera).
- Diepte
  De hydraulische randvoorwaarden behorend bij de locatie knik in de Afsluitdijk (1.000 m uit de buitenkruinlijn) behoren bij een bodempeil van -11,20 m+NAP. De hydraulische randvoorwaarden voor deze locatie kunnen worden omgerekend naar waarden ter plaatse van de buitenteen van de Afsluitdijk. De diepte ter plaatse van de buitenteen van de Afsluitdijk verschilt in kleine mate, alleen op het traject Kornwerderzand – Zurich is er sprake van een sterkere afwijking waarbij enkele delen bij eb zelfs droogvallen. Zie appendix C voor een kaart met de waterdiepten rond de Afsluitdijk.
- Stroming
  Op basis van gegevens van de sedimentatlas kan worden vastgesteld dat ter plaatse van de buitenteen van de Afsluitdijk nagenoeg geen stroming optreedt. Dit heeft dus geen gevolgen voor het gebruik van de hydraulische randvoorwaarden op andere locaties.

De hydraulische condities voor de Afsluitdijk zijn verschillend op verschillende locaties (in de lengterichting van de dijk) waardoor het niet geheel valide is de hydraulische randvoorwaarden ter

plaatse van de knik van de Afsluitdijk voor de gehele dijk toe te passen. Echter zullen deze waarden toch toegepast worden vanwege het gebrek van betere gegevens.

Voor beide klimaatscenario's zijn hieronder de hydraulische randvoorwaarden gegeven:
- Klimaatscenario G+:
  - Maatgevende Hoog Waterstand (MHW): h_{mhw} = 5,78 m+NAP;
  - Golfhoogte: H_{m0} = 3,5 m;
  - Golfperiode: T = 8,1 s.
- Klimaatscenario W+:
  - Maatgevende Hoog Waterstand (MHW): h_{mhw} = 6,03 m+NAP;
  - Golfhoogte (niet bepaald, maar genoemde waarde wordt aangehouden): H_{m0} = 3,5 m;
  - Golfperiode (niet bepaald, maar genoemde waarde wordt aangehouden): T = 8,1 s.

Bovenstaande hydraulische randvoorwaarden (voor beide klimaatscenario's) gelden op een afstand van 1.000 m uit de buitenkruinlijn van de Afsluitdijk. Om deze waarden te kunnen gebruiken voor ontwerp dienen deze te worden omgerekend naar waarden ter plaatse van de buitenteen van de Afsluitdijk. In appendix O is te zien hoe met behulp van het rekenmodel SWAN-1D de hydraulische randvoorwaarden zijn vastgesteld.
De hydraulische randvoorwaarden volgend uit beide berekeningen zijn in Tabel 6.1 weergegeven.

Tabel 6.1 Overzicht hydraulische randvoorwaarden

		klimaatscenario G+			klimaatscenario W+		
	s	h_{mhw}	H_{m0}	T_p	h_{mhw}	H_{m0}	T_p
locatie	(m)	(m+NAP)	(m)	(s)	(m+NAP)	(m)	(s)
Waddenzee	0	5,78	3,30	8,05	6,03	3,30	8,05
teen Afsluitdijk	964,40	5,78	3,30	8,05	6,03	3,30	8,05

De in Tabel 6.1 gegeven hydraulische randvoorwaarden zullen voor het maken van een integraal ontwerp (in dit onderzoek) worden toegepast voor het gehele dijklichaam van de Afsluitdijk.

Verder geldt voor het Waddengebied een stormduur t_s van 45 uur.

De Afsluitdijk dient afhankelijk van de verbeteringsmaatregelen voor de Afsluitdijk bestand te zijn tegen een overslagdebiet van:
- q = 0,1 l/s/m in geval van een zandige grond met een slechte grasmat;
- q = 1 l/s/m in geval van een kleiige grond met een redelijk goede grasmat
- q = 10 l/s/m in geval van een kleibekleding en een grasmat volgens de eisen voor het buitentalud of bij een bekledingsconstructie. Verder hoeft de kruin van een zeedijk onder maatgevende omstandigheden niet begaanbaar te zijn;
- q = 40 l/s/m in geval van een overslagbestendige dijk. Verder hoeft de kruin van een zeedijk onder maatgevende omstandigheden niet begaan baar te zijn.

<u>Overige veranderlijke belastingen</u>

a. Wind
   De invloed van windbelasting is via waterstand en golven meegenomen in berekening van de hydraulische randvoorwaarden. Verder zijn er in het gemiddelde dwarsprofiel geen elementen (zoals struiken en bomen) aanwezig die windbelasting over kunnen brengen op grondconstructies. Hier behoeft dan ook geen rekening mee te worden gehouden;
b. IJs
   Bij het ontwerpen behoeft geen rekening gehouden te worden met de mogelijke belasting ten gevolge van ijs aangezien de ijsvorming bij de Nederlandse kust niet van enige betekenis is.

c. Verkeer
   De verkeersbelasting ter plaatse van rijksweg A7 bedraagt: 10 kN/m^2 (over een breedte van 5 m);
d. Aardbevingen
   De kans op schade aan grondconstructies door een aardbeving is in Nederland zeer klein (< 10^{-4} per jaar). Omdat aardbevingen en extreem hoog water twee onafhankelijke gebeurtenissen zijn, is de bijdrage aan de kans op falen van grondconstructies geheel te verwaarlozen.
e. Bodemonderzoek en explosies
   Bij het ontwerpen wordt geen rekening gehouden met de mogelijke belasting ten gevolge van bodemonderzoek en explosies.
f. Aanvaringen en drijvende voorwerpen
   Bij het ontwerpen wordt geen rekening gehouden met de mogelijke belasting ten gevolge van schepen en drijvende voorwerpen.
g. Biologische aantasting
   Flora en fauna kunnen de fysische eigenschappen van bijvoorbeeld een dijkbekleding veranderen. De doorlatendheid van open bekledingen kan verminderen, of de ruwheid kan veranderen. Verder kunnen dieren gangen of holen graven, of een afdekkende kleibekleding aantasten of doorgraven wat kan leiden tot een hogere freatische lijn in het grondlichaam. Bij het ontwerpen wordt geen rekening gehouden met de mogelijke aantasting van het dijklichaam door flora en fauna.
h. Chemische aantasting
   Constructiematerialen kunnen door oxidatie, zout water en door stoffen die in vervuild water voorkomen, worden aangetast. Bij het maken van een integraal ontwerp zal hier, indien noodzakelijk, rekening mee worden gehouden.
i. Klimatologische aantasting
   Door bevriezing kan opgesloten water uitzetten waardoor constructiematerialen aangetast kunnen worden. Door droogte kunnen krimpscheuren in een te dunne kleilaag ontstaan. Ultraviolette straling kan bijvoorbeeld geotextielen en kunststofschermen aantasten waardoor deze beschermd dienen te worden. Bij het ontwerpen zal met deze vormen van aantasting rekening worden gehouden.
j. Vandalisme en medegebruik
   Met vandalisme en medegebruik zal zoveel mogelijk rekening te gehouden worden. Er zal getracht worden de mogelijkheden tot vandalisme zoveel mogelijk te beperken (zie ook paragraaf 5.4.2).

6.4.2 Kunstwerken en bijzondere constructies

Permanente belastingen

- Eigen gewicht constructie(onderdelen)
  De hydraulische belastingen voor kunstwerken en bijzondere constructies die voor de Afsluitdijk van toepassing zijn, worden besproken in paragraaf 6.4.1.
- Gronddruk
  De hydraulische belastingen voor kunstwerken en bijzondere constructies die voor de Afsluitdijk van toepassing zijn, zijn besproken in paragraaf 6.4.1.
- (Grond)waterdruk (ook opdrijvende kracht)
  De (grond)waterdruk (en opdrijvende kracht) wordt besproken in de paragraaf 6.4.1.

Veranderlijke belastingen

Hydraulische belastingen

Een groot deel van de hydraulische belastingen voor kunstwerken en bijzondere constructies die voor de Afsluitdijk van toepassing zijn, zijn besproken in paragraaf 6.4.1.

De resterende hydraulische belastingen worden hieronder besproken:

- Stroming
  De belasting door stroming is gekoppeld aan de stroomsnelheid welke weer afhankelijk is van factoren zoals de taludhelling, de afstand tot de buitenkruinlijn, et cetera. Per ontwerp zal de stroomsnelheid vastgesteld en getoetst dienen te worden.
- Scheepsgolven en/of translatiegolven (niet tijdens MHW)
  Aangezien het ontwerp van de Afsluitdijk met zonnepanelen niet in aanraking zal komen met scheepsgolven en/of translatiegolven mag de invloed hiervan worden verwaarloosd.
- Scheepsstroming
  Aangezien het ontwerp van de Afsluitdijk met zonnepanelen niet in aanraking zal komen met scheepsstroming mag de invloed hiervan worden verwaarloosd.

Overige veranderlijke belastingen

- Troskrachten
  Troskrachten zijn niet van toepassing op de situatie bij de Afsluitdijk.
- Verkeersbelastingen
  De verkeersbelasting ter plaatse van rijksweg A7 bedraagt: 10 kN/m^2 (over een breedte van 5 m);
- Temperatuurbelastingen
  Het bepalen van de temperatuurbelasting die van toepassing is op constructies valt buiten het kader van dit onderzoek. Wel zal rekening worden gehouden met de uitzetting van de gebruikte constructiematerialen. Zie hiervoor appendix Q.
- Winddrukken
  Het bepalen van de windbelasting die van toepassing is op constructies valt buiten het kader van dit onderzoek.

Bijzondere belastingen

- Aanvaringen
  Zie paragraaf 6.4.1.
- Aardbevingen
  Zie paragraaf 6.4.1.
- Explosies
  Zie paragraaf 6.4.1.
- IJs
  Zie paragraaf 6.4.1.
- Stroming in geval van niet sluiten
  Stroming in geval van niet sluiten is niet van toepassing op de situatie bij de Afsluitdijk.
- Vandalisme en sabotage
  Zie paragraaf 6.4.1 en paragraaf 5.4.2.

6.5 Constructieve randvoorwaarden

Op constructies om bijvoorbeeld zonnepanelen te kunnen plaatsen zijn de volgende randvoorwaarden van toepassing:

- De constructie mag het functioneren van de Afsluitdijk op geen enkele wijze aantasten en dient deze bij voorkeur te verbeteren;
- De constructie mag de kans op falen of bezwijken van waterkering de Afsluitdijk op geen enkele wijze vergroten en dient deze bij voorkeur zelfs te verkleinen;
- De levensduur van de constructies (met bijbehorende onderdelen) dient minimaal tot en met het jaar 2050 gegarandeerd te zijn;
- De constructie dient dusdanig te worden ontworpen dat deze de uitvoering van het project vergemakkelijkt, bijvoorbeeld door het gebruik van geprefabriceerde elementen.

6.6 Randvoorwaarden bekleding

Constructief gezien moet de bekleding:

- Bestand zijn tegen de belastingen;
- Uitspoeling van onderliggende gronddeeltjes voorkomen;
- Bestand zijn tegen invloeden van weer en wind, en tegen erosie door overspoelend materiaal;
- Vormveranderingen van de ondergrond (talud) kunnen volgen;
- Stabiel zijn tegen afschuiven (geldt voor het geheel van bekleding en ondergrond.

6.7 Randvoorwaarden fotovoltaïsche zonnepanelen

Voor de toepassing van fotovoltaïsche zonnepanelen gelden de volgende randvoorwaarden:

- De zonnepanelen dienen bij voorkeur gericht te kunnen worden op het zuiden (met een marge van 39° westelijk en 32° oostelijk ten opzichte van het zuiden voor een behoud van 95% van de instraling bij een hellingshoek van de fotovoltaïsche zonnepanelen van 23°). Zie appendix I, Figuur I.18;
- De randvoorwaarden voor de helling van de fotovoltaïsche zonnepanelen zijn:
  - op basis van een 95% instralingsrendement (zie appendix I, Figuur I.18): $7° \leq \alpha \leq 66°$;
  - op basis van het voorkomen van reflectie t.o.v. verkeer (zie Figuur 5.4): $10° \leq \alpha \leq 50°$;

  waarbij de reflectie van het verkeer de maatgevende helling geeft.
- Er dient ruimte te worden vrijgehouden voor in de lengterichting van de dijk doorlopende kabelgoten (afmetingen 0,10 m bij 0,10 m) en de plaatsing van omvormers (afmetingen 0,70 m bij 0,70 m bij 0,50 m);
- Zonnepanelen mogen (onder maatgevende omstandigheden) niet volledig onder water komen te staan;
- Zonnepanelen zijn niet bestand tegen drukken ten gevolge van golfklappen;
- Maximale toelaatbaar debiet waar zonnepanelen (aan bovenzijde) tegen bestand zijn: $q = x$ l/s/m;
- De afmetingen (lengte en breedte) voor de zonnepanelen zijn vrij te kiezen;
- De dikte voor een zonnepaneel bedraagt 2 cm;
- De maximaal toelaatbare doorbuiging (van het glas) van een zonnepaneel is $5 \cdot 10^{-3}$ m per strekkende meter zonnepaneel;
- De soortelijke massa die voor zonnepanelen kan worden aangehouden (ρ_z) is 2.500 kg/m^3, met een zonnepaneel van 2 cm dik betekent dit een gewicht van 50 kg/m^2;
- Belasting ten gevolge van neerslag (sneeuw): P_{rep} = 0,56 kN/m^2;
- Belasting ten gevolge van winddruk: P_{rep} = 0,00 kN/m^2;
- Belasting ten gevolg van windzuiging: P_{rep} = -0,45 kN/m^2.

6.8 Randvoorwaarden cultuurhistorie en natuur

Op de Afsluitdijk zijn op het gebied van cultuurhistorie en natuur enkele wetten en richtlijnen waar rekening mee gehouden dient te worden. Dit zijn de:

- Monumentenwet
  Elementen die onder de monumentenwet vallen mogen zonder vergunning niet worden verwijderd of hersteld. Onder de monumentenwet vallen de volgende elementen van de Afsluitdijk:
  - De gehele Stelling van Den Oever;
  - De Lorentz- en Stevinsluizen;
  - Het monument van Dudok;
  - De lichtopstand;
  - Het peilschaalhuis;

  - Het douanekantoor;
  - De grenspaal;
  - Diverse delen van de Stelling van Kornwerderzand.
- Planologische kernbeslissing Waddenzee
  De Afsluitdijk ligt op de grens van het werkgebied van de planologische kernbeslissing (PKB) Waddenzee. In de PKB Waddenzee worden de plannen voor de Waddenzee weergegeven en zijn in dit geval rechtsgeldig. In de PKB Waddenzee is bijvoorbeeld weergegeven of zand mag worden gewonnen in de Waddenzee en op welke plaatsen er visserij mag plaatsvinden. Er zal getracht worden zoveel mogelijk rekening te houden met de eisen vanuit de PKB Waddenzee.
- Natuurwetgeving
  Onder de natuurwetgeving vallen: de habitatrichtlijn, vogelrichtlijn en flora- en faunawet. Deze wetten dienen gerespecteerd te worden.

Buiten de wetten zijn er ook nog kenmerken van de Afsluitdijk waarvan door belangenorganisaties graag wordt gezien dat deze behouden blijven. Het is geen noodzaak deze te behouden, echter kan bij het maken van een integraal ontwerp wel rekening worden gehouden met deze wensen. Dit betreft de volgende kenmerken:

- Icoon van waterstaatsgeschiedenis en de strijd van de Nederlanders tegen het water;
- Ruimtelijke omgeving en het ontbreken van bebouwing;
- Eenvormige, consequent toegepaste vormgeving, continu dwarsprofiel en eenheid in materiaalgebruik;
- De bouwwerken op de Afsluitdijk vormen één geheel wat betreft stijl en periode;
- Uiterlijk en inrichting zijn sinds de aanleg vrijwel gelijk gebleven.

Verder heeft de Rijksdienst voor archeologie, cultuurlandschap en monumenten de volgende wensen:

- De Afsluitdijk dient als samenhangend geheel beschouwd te worden bij ruimtelijke wijzigingen;
- De openheid van landschap rond de Afsluitdijk dient te worden gerespecteerd;
- Eventueel nieuwe bouwwerken dienen de bestaande stijl te respecteren.

6.9 Conclusie

Tekst voor deze paragraaf volgt nog…

7 Toetspunten integrale oplossingen



Figuur 7.1 Indeling hoofdstuk 7

7.1 Inleiding

Voor iedere integrale oplossing dient te worden aangetoond dat wordt voldaan aan de randvoorwaarden en ontwerpeisen. Dit wordt gedaan door een integrale oplossing te toetsen aan de hand van de volgende punten:

1. kruinhoogte (paragraaf 7.2);
2. golfoploophoogte en golfoverslaghoogte (paragraaf 7.3);
3. laagdikte en stroomsnelheid van overslag (paragraaf 7.4);
4. piping en heave (paragraaf 7.5);
5. macrostabiliteit binnenwaarts (paragraaf 7.6);
6. macrostabiliteit buitenwaarts (paragraaf 7.7);
7. microstabiliteit (paragraaf 7.8);
8. stabiliteit van het voorland (paragraaf 7.9);
9. stabiliteit van de bekleding (paragraaf 7.10).

Opmerking: in dit hoofdstuk wordt geen onderscheid gemaakt tussen een algemene situatie en de Afsluitdijk aangezien de toetsing op dezelfde manier zal verlopen.

7.2 Kruinhoogte

Het eerste toetspunt is de hoogte van een dijk of dam, waarbij het belangrijkste element de kruinhoogte is. De kruinhoogte van een dijk of dam heeft invloed op de faalmechanismen overloop en overslag. Als de kruinhoogte van een dijk of dam bij toetsing niet blijkt te voldoen, dienen er verbeteringsmaatregelen genomen te worden waardoor een dijk meer overslag aankan of de hoeveelheid overslag verminderd wordt. De faalmechanismen overloop en overslag hebben een onderlinge samenhang, echter worden deze wel apart getoetst, aangezien ook integrale oplossingen mogelijk zijn waarvoor het overslagdebiet getoetst dient te worden (bijvoorbeeld een overslagdijk). Bij oplossingen waarbij de kruin van een dijk of dam wordt verhoogd (volgens de vigerende leidraden

of gelijkwaardig), is toetsing niet noodzakelijk aangezien de overloophoogte, golfoverslaghoogte, et cetera, al in de berekening zijn meegenomen.

Voor het faalmechanisme overloop dient de werkelijke kruinhoogte aan de minimale kruinhoogte getoetst te worden. De minimale kruinhoogte kan worden berekend met vergelijking (7.1):

$$h_{kr} = h_{mhw;xxxx} + h_{hws} + h_t + h_{ovt} + h_{bd} + h_{zkl} \qquad \text{(TAW 2002)} \qquad (7.1)$$

waarin:

h_{kr}	=	kruinhoogte	[m+NAP]
$h_{mhw;xxxx}$	=	maatgevende hoogwaterstand (MHW) voor het jaar xxxx	[m+NAP]
h_{hws}	=	hoogwaterstijging (inclusief NAP-daling) over de ontwerpperiode	[m]
h_t	=	toeslagen voor bui-oscillaties, buistoten of seiches en lokale opwaaiing	[m]
h_{ovs}	=	de golfoploophoogte of een golfoverslaghoogte	[m]
h_{bd}	=	lokaal verwachte bodemdaling over de ontwerpperiode	[m]
h_{zkl}	=	verwachte kruindaling door klink en zetting van de ondergrond over de ontwerpperiode	[m]

Als de kruinhoogte van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen is verdere toetsing met betrekking tot de kruinhoogte niet noodzakelijk. Wel dient de bekleding, bij toepassing van een nieuwe of andere dijkbekleding, te worden getoetst aan de vastgestelde hoeveelheid golfoverslag (zie golfoverslag en toetsing dijkbekleding).
Als de kruinhoogte van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verbetering van de dijkbekleding: door verbetering van de bekleding van de kruin en/of het binnentalud kan een dijk bij een gelijkblijvende kruinhoogte voldoen aan de normen, aangezien deze daardoor beter bestand is tegen een bepaalde hoeveelheid golfoverslag;
- Verhoging van de kruin: door verhoging van de kruin tot de minimale hoogte kan aan de eisen voor het faalmechanisme overloop worden voldaan. Tevens kunnen hiermee gunstigere randvoorwaarden voor de toetsing van andere faalmechanismen worden geschept, zoals overslag.

7.3 Golfoploophoogte en golfoverslaghoogte

Als de kruinhoogte bij verbetering van een dijk opnieuw wordt vastgesteld is de golfoploophoogte of golfoverslaghoogte inbegrepen. Voldoet de kruinhoogte niet en wordt de bekleding overslagbestendig gemaakt, dient toetsing op de hoeveelheid golfoverslag uitgevoerd te worden (bijvoorbeeld bij een oplossing met een overslagdijk). De golfoploophoogte en golfoverslaghoogte (golfoverslagdebiet) worden hieronder toegelicht.

7.3.1 Golfoploophoogte

De golfoploophoogte kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} = 1{,}75\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\xi_0 \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad (7.2)$$

met een maximum voor waarden van de brekerparameter ξ_0 groter dan 1,75:

$$\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \gamma_\beta \left(4{,}3 - \frac{1{,}6}{\sqrt{\xi_0}} \right) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad (7.3)$$

waarin:

$z_{2\%}$	=	2%-golfoploopniveau boven de stilwaterlijn	[m]
H_{m0}	=	significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	=	brekerparameter	[-]
γ_b	=	invloedsfactor voor een berm	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor ruwheid op het talud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor scheve golfaanval	[-]

Vergelijking (7.2) en vergelijking (7.3) zijn geldig in het gebied $0{,}5 < \gamma_b \xi_0 < 8$ à 10.
Verder moet het volgende gelden: $\gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \geq 0{,}4$.

7.3.2 Golfoverslaghoogte

Voor de golfoverslaghoogte dient de hoeveelheid golfoverslag bij een bepaalde kruinhoogte vastgesteld te worden aan de hand van de hydraulische randvoorwaarden en de geometrie van de dijk. De hoeveelheid golfoverslag kan dan getoetst worden aan het maximum toelaatbare golfoverslagdebiet (zie paragraaf 6.4.1). De hoeveelheid golfoverslag kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{0{,}067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_0 \exp\left(-4{,}3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad (7.4)$$

met als maximum:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = 0{,}2 \exp\left(-2{,}3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f - \gamma_\beta} \right) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad (7.5)$$

met: $\xi_0 = \dfrac{\tan\alpha}{\sqrt{s_{m-1,0}}}$

met: $s_{m-1,0} = \dfrac{H_{m0}}{L_0}$, $L_0 = \dfrac{g T_{m-1,0}^2}{2\pi}$ en $T_{m-1,0} = \dfrac{T_p}{1{,}1}$

waarin:

q	=	gemiddeld golfoverslagdebiet per meter	[$m^3/s/m$]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s^2]
H_{m0}	=	spectrale golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	=	brekerparameter	[-]
$s_{m-1,0}$	=	golfsteilheid	[-]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode bij de teen van de dijk	[s]
T_p	=	piekperiode bij de teen van de dijk	[s]
α	=	hoek van het buitentalud	[-]
h_k	=	vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn	[m]
γ_b	=	invloedsfactor voor invloed van een berm op het talud	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor invloed van ruwheid op het talud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor invloed van hoek van golfaanval op het talud	[-]
γ_v	=	invloedsfactor voor invloed van een verticale wand op het talud	[-]

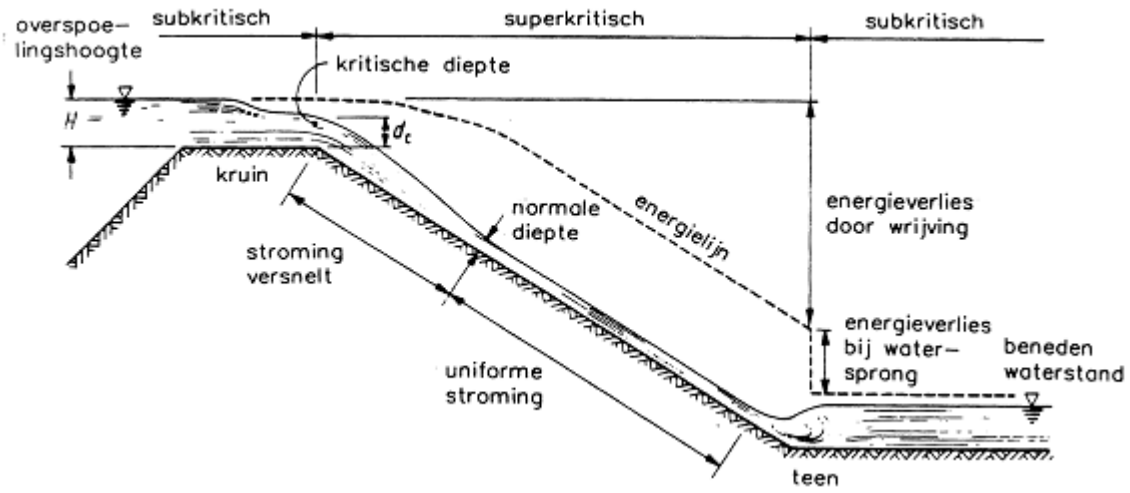
Vergelijkingen (7.2) tot en met (7.5) zijn verwerkt in het programma 'PC-Overslag', waarmee, bij een gegeven dwarsprofiel, de golfoploophoogte en golfoverslaghoogte (golfoverslagdebiet) kunnen worden bepaald.

Als de golfoploophoogte of golfoverslaghoogte (golfoverslagdebiet) van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen is verdere toetsing met betrekking tot de golfoploophoogte of golfoverslaghoogte (golfoverslagdebiet) niet noodzakelijk.
Als de golfoploophoogte of golfoverslaghoogte (golfoverslagdebiet) van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verbetering van de dijkbekleding: door verbetering van de bekleding van de kruin en/of het binnentalud kan een dijk bij een gelijkblijvende kruinhoogte voldoen aan de normen, aangezien deze daardoor beter bestand is tegen een bepaalde hoeveelheid golfoverslag;
- Verhoging van de kruin: door verhoging van de kruin kan de hoeveelheid golfoverslag verminderen, met als gevolg een kleinere kans op falen van de kruin en het binnentalud.

7.4 Laagdikte en stroomsnelheid van overslag

Om vast te kunnen stellen of de bekleding van het binnentalud aan de veiligheidsnormen voldoet, dienen de laagdikte en de stroomsnelheid bij een bepaalde hoeveelheid overslag vastgesteld te worden. Zie Figuur 7.2 voor een schematische weergave.



Figuur 7.2 Stroming over een dijk bij een lage binnenwaterstand (Akkerman, 1998)

Schüttrumpf en Van Gent hebben onderzoek gedaan naar de laagdikte en stroomsnelheid van golfoverslag en hebben hier rekenregels voor opgesteld. Echter zijn er verschillen in de resultaten van beide onderzoeken. Om de oorzaak van deze verschillen te kunnen verklaren en recht te trekken heeft Bosman dit onderzocht. Uit dit onderzoek bleek de oorzaak van de verschillen te liggen in de volgende punten:

- Opbouw van het model
  Bij de proeven die Schüttrumpf en Van Gent hebben uitgevoerd, zijn verschillende hellingen voor het buitentalud gebruikt. De stroomsnelheid en laagdikte aan de zeezijde van de kruin zijn echter afhankelijk van de helling van het buitentalud, terwijl deze parameters niet in de rekenregels zijn verwerkt. Dit leidt tot verschillende resultaten voor de theorieën. Het verschil tussen de modellen van Schüttrumpf en Van Gent betreft voor de empirische coëfficiënten van de laagdikten een factor 2,2 en voor de empirische coëfficiënten van de stroomsnelheden een factor 1,5.
- Verschillende schaalgrootten
  Schüttrumpf heeft het onderzoek uitgevoerd met groot- en kleinschalige testen. Van Gent heeft het onderzoek uitgevoerd met alleen kleinschalige testen. Het blijkt dat de gemeten stroomsnelheden bij de grootschalige testen van Schüttrumpf niet correct zijn gemeten. De snelheid van hoogturbulente, niet stationaire, met lucht gevulde stromingen zijn erg moeilijk te meten. Dit is van invloed op de resultaten van het onderzoek van Schüttrumpf.

Bosman heeft op basis van het onderzoek nieuwe vergelijkingen opgesteld. De theorieën van Schüttrumpf, Van Gent en Bosman zullen alle drie gebruikt worden voor het vaststellen van de laagdiktes en stroomsnelheden. Deze theorieën worden hieronder behandeld.

7.4.1 Theorie van Schüttrumpf

De theorie van Schüttrumpf beschrijft de laagdikte en stroomsnelheid op de kruin en het binnentalud.

Golfoploop

De golfoploop voor de 2%-golfoploop voor onregelmatige golven volgens de theorie van Schüttrumpf is:

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma_f \gamma_\beta H_s} = 3\tanh\left(0{,}65\xi_0\right) \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.6)$$

Zeezijde van de kruin

De maximum laagdikte respectievelijk de maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven aan de zeezijde van de kruin kunnen worden berekend met:

$$\frac{h_{2\%}(x_c=0)}{H_s} = c'_{h,2\%}\left(\frac{z_{2\%}-R_c}{H_s}\right) \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.7)$$

$$\frac{u_{2\%}(x_c=0)}{\sqrt{gH_s}} = c'_{u,2\%}\left(\frac{z_{2\%}-R_c}{H_s}\right) \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.8)$$

waarin:

$h_{2\%}$	=	maximum laagdikte overschreden door 2% van de inkomende golven	[m]
$u_{2\%}$	=	maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven	[m/s]
x_c	=	x-coördinaat op de kruin	[m]
R_c	=	vrije kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn	[m]
$c'_{h,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c'_{u,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]

Landzijde van de kruin

De maximum laagdikte respectievelijk de maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven aan de landzijde van de kruin kunnen worden berekend met:

$$\frac{h_{2\%}(x_c)}{H_s} = c'_{h,2\%}\left(\frac{z_{2\%}-R_c}{H_s}\right)\exp\left(-c''_{h,2\%}\frac{x_c}{B_c}\right) \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.9)$$

$$\frac{u_{2\%}(x_c)}{\sqrt{gH_s}} = c''_{u,2\%}\sqrt{\frac{z_{2\%}-R_c}{H_s}}\exp\left(-\mathrm{f}\frac{B_c}{2h_{2\%}(x_c)}\right) \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.10)$$

waarin:

B_c	=	kruinbreedte	[m]
$c''_{h,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c''_{u,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
f	=	weerstandscoëfficiënt	[-]

Binnentalud

De laagdikte respectievelijk de stroomsnelheid op het binnentalud kunnen worden berekend met:

$$h_{is}(s) = \frac{u_0 h_0}{u_{is}(s)} \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.11)$$

$$u_{is}(s) = \frac{u_0 + \frac{k_1 h_0}{f}\tanh\left(\frac{k_1 k_2}{2}\right)}{1 + \frac{f u_0}{h_0 k_1}\tanh\left(\frac{k_1 k_2}{2}\right)} \qquad \text{(Schüttrumpf, 2001)} \qquad (7.12)$$

met: $k_1 = \sqrt{\frac{2f \cdot g\sin\beta}{h_0}}$ and $k_2 = -\frac{u_0}{g\sin\beta} + \sqrt{\frac{u_0^2}{(g\sin\beta)^2} + \frac{2s}{g\sin\beta}}$

waarin:

h_{is}	=	laagdikte op het binnentalud	[m]
u_{is}	=	stroomsnelheid op het binnentalud	[m/s]
s	=	positie op het binnentalud	[m]
u_0	=	stroomsnelheid aan de landzijde van de kruin	[m/s]
h_0	=	laagdikte aan landzijde van de kruin	[m]
β	=	hoek van binnentalud	[°]

7.4.2 Theorie van Van Gent

De theorie van Van Gent beschrijft de laagdikte en stroomsnelheid op de kruin en het binnentalud.

Golfoploop

De golfoploop voor de 2%-golfoploop voor onregelmatige golven volgens de theorie van Van Gent is:

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma_f \gamma_\beta H_s} = c_0 \xi_0 \qquad \text{voor } \xi_0 \le p \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.13)$$

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma_f \gamma_\beta H_s} = \frac{c_1 - c_2}{\xi_0} \qquad \text{voor } \xi_0 > p \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.14)$$

met: $p = 0{,}5\frac{c_1}{c_0}$

waarin:

c_0	=	parameter volgens Van Gent	[-]
c_1	=	parameter volgens Van Gent	[-]
c_2	=	parameter volgens Van Gent	[-]

Zeezijde van de kruin

De maximum laagdikte respectievelijk de maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven aan de zeezijde van de kruin kunnen worden berekend met:

$$\frac{h_{2\%}(x_c = 0)}{H_s} = c'_{h,2\%}\left(\frac{z_{2\%} - R_c}{\gamma_f H_s}\right) \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.15)$$

$$\frac{u_{2\%}\left(x_c=0\right)}{\sqrt{gH_s}}=c_{u,2\%}^{'}\sqrt{\frac{z_{2\%}-R_c}{\gamma_f H_s}} \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.16)$$

waarin:

$h_{2\%}$	=	maximum laagdikte overschreden door 2% van de inkomende golven	[m]
$u_{2\%}$	=	maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven	[m/s]
x_c	=	x-coördinaat op de kruin	[m]
R_c	=	vrije kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn	[m]
$c_{h,2\%}^{'}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c_{u,2\%}^{'}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor de ruwheid op het buitentalud	[-]

Landzijde van de kruin

De maximum laagdikte respectievelijk de maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven aan de landzijde van de kruin kunnen worden berekend met:

$$\frac{h_{2\%}\left(x_c=B_c\right)}{H_s}=c_{h,2\%}^{''}\left(\frac{z_{2\%}-R_c}{\gamma_f H_s}\right) \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.17)$$

$$\frac{u_{2\%}\left(x_c=B_c\right)}{\sqrt{gH_s}}=c_{u,2\%}^{'}\sqrt{\gamma_c}\sqrt{\frac{z_{2\%}-R_c}{\gamma_c H_s}}\Bigg/\left(1+c_{u,2\%}^{''}\frac{B_c}{H_s}\right) \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.18)$$

waarin:

$c_{h,2\%}^{''}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c_{u,2\%}^{'}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
$c_{u,2\%}^{''}$	=	empirische coëfficiënt	[-]
γ_c	=	invloedsfactor door weerstand op de kruin	[-]

Vergelijking (7.18) is alleen geldig indien de kruinbreedte groter is dan de golfhoogte ($B_c > H_{s;toe}$).

Binnentalud

De laagdikte respectievelijk de stroomsnelheid op het binnentalud kunnen worden berekend met:

$$h_{is}\left(s\right)=\left(h_0 u_0\right)\Bigg/\left(\frac{b_1}{b_2}+\mu\exp\left(-3b_1 b_2^2 s\right)\right) \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.19)$$

$$u_{is}\left(s\right)=\frac{b_1}{b_2}+\mu\exp\left(-3b_1 b_2^2 s\right) \qquad \text{(Gent, 2002)} \qquad (7.20)$$

met: $b_1=\sqrt[3]{g\sin\beta}$, $b_2=\sqrt[3]{\frac{0,5f_L}{h_0 u_0}}$ and $\mu=u_0-\frac{b_1}{b_2}$

waarin:

h_{is}	=	laagdikte op het binnentalud	[m]
u_{is}	=	stroomsnelheid op het binnentalud	[m/s]
s	=	positie op het binnentalud	[m]
u_0	=	stroomsnelheid aan de landzijde van de kruin	[m/s]
h_0	=	laagdikte aan landzijde van de kruin	[m]
β	=	hoek van binnentalud	[°]
f_L	=	invloedsfactor door weerstand op het binnentalud	[-]

7.4.3 Theorie van Bosman

De theorie van Bosman beschrijft de laagdikte en stroomsnelheid op de kruin en het binnentalud.

Golfoploop

De golfoploop voor 2% van de golfoploop voor onregelmatige golven in de theorie van Bosman is hetzelfde als in het Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken (TAW, 2002):

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta H_s} = 1{,}75 \xi_0 \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad (7.21)$$

Zeezijde van de kruin

De maximum laagdikte respectievelijk de maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven aan de zeezijde van de kruin kunnen worden berekend met:

$$h_{2\%}\left(x_c = 0\right) = \frac{7 \cdot 10^{-3}}{\sin^2 \alpha}\left(\frac{z_{2\%} - R_c}{\gamma_c H_s}\right) \qquad \text{(Bosman, 2007)} \qquad (7.22)$$

$$\frac{u_{2\%}\left(x_c = 0\right)}{\sqrt{g H_s}} = \frac{0{,}25}{\sin\alpha}\sqrt{\frac{z_{2\%} - R_c}{\gamma_f H_s}} \qquad \text{(Bosman, 2007)} \qquad (7.23)$$

waarin:

$h_{2\%}$	=	maximum laagdikte overschreden door 2% van de inkomende golven	[m]
$u_{2\%}$	=	maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven	[m/s]
x_c	=	x-coördinaat op de kruin	[m]
R_c	=	vrije kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn	[m]
γ_c	=	invloedsfactor voor de ruwheid op de kruin	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor de ruwheid op het buitentalud	[-]
α	=	hoek van het buitentalud	[°]

Verder beschrijft Bosman de overslagtijd:

$$\frac{T_{ovt,2\%}\left(x_c = 0\right)}{T_{m-1,0}} = 1{,}02\sqrt{\frac{z_{2\%} - R_c}{\gamma_f H_s}} \qquad \text{(Bosman, 2007)} \qquad (7.24)$$

waarin:

$T_{ovt,2\%}$	=	overslagtijd	[s]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode	[s]

Kruin

De maximum laagdikte respectievelijk de maximum stroomsnelheid overschreden door 2% van de inkomende golven op de kruin kunnen worden berekend met:

$$\frac{h_{2\%}(x_c)}{h_{2\%}(x_c=0)} = 0,81\exp\left(-6\frac{x_c}{\gamma_c L_0}\right) \quad \text{(Bosman, 2007)} \quad (7.25)$$

$$\frac{u_{2\%}(x_c)}{u_{2\%}(x_c=0)} = \exp\left(-0,042\frac{x_c}{\gamma_c h_{2\%}(x_c)}\right) \quad \text{(Bosman, 2007)} \quad (7.26)$$

Verder beschrijft Bosman de overslagtijd:

$$\frac{T_{ovt,2\%}(x_c)}{T_{ovt,2\%}(x_c=0)} = \left(1,67+0,24\ln\left(\frac{x_c}{L_0}\right)\right) \quad \text{(Bosman, 2007)} \quad (7.27)$$

Binnentalud

Voor de laagdikte respectievelijk de stroomsnelheid op het binnentalud dient evenals in de theorie van Van Gent (zie paragraaf 7.4.2) de eendimensionale ondiep watervergelijking gebruikt te worden:

$$u\frac{du}{ds} + g\left(\cos\beta\frac{dh}{ds} - \sin\beta\right) + \frac{1}{2}f_L\frac{u^2}{h} = 0 \quad \text{(Gent, 2002)} \quad (7.28)$$

wat resulteert in dezelfde vergelijkingen voor het binnentalud als in paragraaf 7.4.2.

Volume

Het maximum volume van een overslaande golf overschreden door 2% van de inkomende golven kan op twee manieren beschreven worden. Vergelijking (7.29) is gebaseerd op het feit dat het verschil in tijd van laagdikte en stroomsnelheid driehoekig is van vorm. Het volume kan daarom worden gebaseerd op de maximum laagdikte, stroomsnelheid en overslagtijd. Vergelijking (7.30) beschrijft de relatie tussen het volume van een overslaande golf en het restant van de golfoploop.

$$\frac{V_{2\%}}{H_s^2} = 0,40\frac{u_{2\%}}{\sqrt{gH_s}}\frac{h_{2\%}}{H_s}\frac{T_{ovt,2\%}}{T_{m-1,0}} \quad \text{(Bosman, 2007)} \quad (7.29)$$

$$\frac{V_{2\%}}{H_s^2} = c'_{V,2\%}\left(\frac{z_{2\%}-R_c}{H_s\gamma_c}\right)^2 \quad \text{(Bosman, 2007)} \quad (7.30)$$

waarin:

$V_{2\%}$	=	overslagvolume overschreden door 2% van de inkomende golven	[m^3/s/m]
$c'_{V,2\%}$	=	empirische coëfficiënt	[-]

De coëfficiënt $c'_{V,2\%}$ is alleen bepaald voor een 1:4 modeldijk en heeft een waarde $c'_{V,2\%} = 0,89$. De coëfficiënt voor een 1:6 modeldijk bedraagt $c'_{V,2\%} = 1,59$ volgens de Weibull distributie voor volumes van golfoverslag.

De laagdikten en stroomsnelheden zijn voor de huidige situatie niet getoetst, echter is dit wel noodzakelijk bij het maken van een integraal ontwerp waarbij bijvoorbeeld zonnepanelen op de kruin of het binnentalud worden geplaatst:

- Uit de laagdikte volgt namelijk de belasting voor een zonnepaneel (de laagdikte kan worden gezien als de hoogte van de waterkolom boven een zonnepaneel);
- Met de stroomsnelheid kunnen de krachten op de zijkant (rand) van een zonnepaneel en de afmetingen voor bijvoorbeeld stortsteen worden bepaald.

7.5 Piping en heave

Bij toetsing op piping en heave worden de kwelweglengte en de opdrukveiligheid beschouwd. Zie appendix F, vergelijking (F.4) tot en met vergelijking (F.6) voor het bepalen van de kwelweglengte en de opdrukveiligheid.
Als een dijk of dam met betrekking tot de faalmechanismen piping en heave bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen en het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam wijzigt niet of nauwelijks, mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als een dijk of dam met betrekking tot de faalmechanismen piping en heave bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen en/of er zijn significante wijzigingen in het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verlenging van de kwelweg: door het vergroten van de kwelweglengte (horizontaal en/of verticaal) wordt meer weerstand geboden tegen piping en heave. Dit kan worden gerealiseerd door toepassing van een kleilaag (voldoende waterdicht en beschermd tegen aantasting), kwelbermen of kwelschermen (damwanden, kleikisten, kistdammen, et cetera.);
- Voorkomen van opbarsten van de kleilaag binnen de kritieke kwelweglengte: door het aanbrengen van meer gewicht, kan worden voorkomen dat een binnendijkse kleilaag opbarst. Dit kan worden gerealiseerd door het binnendijks aanbrengen van een pipingberm;
- Verkleinen van het verval: door het verkleinen van het verval kan de druk op bijvoorbeeld een waterdichte kleilaag binnendijks worden verlaagd. Dit kan worden gerealiseerd door het verlagen van de buitenwaterstand (meestal geen optie), het verhogen van het binnendijks maaiveld (verhoging grondwaterstand) en verhoging van de binnendijkse grondwaterstand;
- Voorkomen van het uitspoelen van zand: door het voorkomen van uitspoeling van zand kan ook piping worden voorkomen. Dit kan worden gerealiseerd door het aanbrengen van een filter (granulair filter of filterdoek).

7.6 Macrostabiliteit binnenwaarts

Om vast te kunnen stellen of erosie van het binnentalud van een grondconstructie (met een begroeiing) door golfoverslag of –overloop optreedt dient te worden getoetst met behulp van de theorie van Joustra en Edelman. Met deze theorie kan de maximale taludhelling van het binnentalud worden bepaald, waarbij de erosie geen significante grootte aanneemt. De erosie is een functie die afhankelijk is van het overslagdebiet, de taludhelling, de grondsoort waarmee het talud is bedekt en de kwaliteit van de begroeiing. De bovengrensvergelijking van Joustra en Edelman voor afstromend water evenwijdig aan taluds boven water voor een homogeen oneindig lang talud is gegeven in appendix F, vergelijking (F.3).

Om de stabiliteit bij infiltratie te kunnen toetsen is een glijvlakberekening met de methode van Bishop (voorafgegaan door een grondwaterstromingsberekening) en/of eindige-elementen methoden noodzakelijk.[1]
Als een dijk of dam met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen en het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam wijzigt niet of nauwelijks, mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als een dijk of dam met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen en/of er zijn significante wijzigingen in het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verflauwing van het binnentalud: door de helling van het binnentalud te verflauwen wordt de stabiliteit van het binnentalud vergroot;
- Verhoging van de kruin: door verhoging van de kruin kan de hoeveelheid golfoverslag verminderen, met als gevolg een kleinere kans op erosie van het binnentalud;
- Toepassing van een binnenberm: als ter plaatse van het binnentalud een berm wordt toegepast wordt de stabiliteit vergroot;
- Toepassing van drainage (bij dijken met een zandkern): door het toepassen van een drainageconstructie kan de freatische lijn laag worden gehouden.

7.7 Macrostabiliteit buitenwaarts

De toetsing van de macrostabiliteit buitenwaarts loopt analoog aan de toetsing voor de macrostabiliteit binnenwaarts, echter spelen de mechanismen opdrijven en opbarsten hierbij geen rol.
Als een dijk of dam met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen en het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam wijzigt niet of nauwelijks, mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als een dijk of dam met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen en/of er zijn significante wijzigingen in het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verflauwing van het buitentalud: door de helling van het buitentalud te verflauwen wordt de stabiliteit vergroot;
- Toepassing van een buitenberm: als ter plaatse van het buitentalud een berm wordt toegepast wordt de stabiliteit vergroot;
- Toepassing van een grondverbetering: grondverbetering dient alleen te worden toegepast indien zeer slappe lagen verantwoordelijk zijn voor een grote zetting (en overhoogte) en/of veel ruimtebeslag door bermen, kan worden overwogen de slappe lagen te verwijderen en te vervangen door zand.

7.8 Microstabiliteit

Bij toetsing op de microstabiliteit wordt, afhankelijk van de opbouw van een dijk of dam (type kern en met of zonder afdekkende lagen), de stabiliteit van grondlagen van beperkte dikte aan het

[1] Een nadere toelichting op de glijvlakberekening (methode van Bishop) en eindige-elementen methoden wordt niet noodzakelijk geacht aangezien, in het geval van de Afsluitdijk, de bekleding van het binnentalud in een eerder stadium van de toetsing zal blijken te voldoen aan de veiligheidsnormen (door verhoging van de kruin, of door verbetering van de bekleding van het binnentalud). Verder worden er geen problemen verwacht met betrekking tot de macrostabiliteit.

oppervlak van een lang talud onder invloed van door een grondlichaam stromend water beschouwd. Het gaat hier om zowel het evenwicht langs rechte glijvlakken, evenwijdig aan het talud, als om het evenwicht in de richting loodrecht op het talud.[2]
Als een dijk of dam met betrekking tot het faalmechanisme microstabiliteit bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen en het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam wijzigt niet of nauwelijks, mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als een dijk of dam met betrekking tot het faalmechanisme microstabiliteit bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen en/of er zijn significante wijzigingen in het dwarsprofiel (geologische opbouw) van de dijk of dam kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verflauwing van het binnentalud: door de helling van het buitentalud te verflauwen kan uitspoelen van materiaal worden voorkomen en vergroot de stabiliteit;
- Toepassing van een berm: als ter plaatse van het binnentalud een berm wordt toegepast wordt de stabiliteit vergroot;
- Toepassing van drainage: door het toepassen van een drainageconstructie kan de freatische lijn laag worden gehouden;
- Aanbrengen van een dikkere kleilaag aan de binnenzijde: door het aanbrengen van een dikkere kleilaag aan de binnenzijde kan opdrukken of afschuiven worden voorkomen;
- Toepassen van minder doorlatende bekleding aan de buitenzijde: door het aanbrengen van een minder doorlatende bekleding aan de buitenzijde kan indringing van buitenwater worden voorkomen of vertraagd.

7.9 Stabiliteit voorland

Bij de stabiliteit van het voorland wordt getoetst op de mechanismen afschuiving (microstabiliteit) en zettingsvloeiing. Voor beide mechanismen wordt op basis van een vuistregel: “In het getijdengebied is nog nooit een inscharing tot aan de waterkering ten gevolge van zettingsvloeiing of afschuiving geconstateerd in natuurlijke geulen waarbij de geuldiepte kleiner was dan 9 m. Dit hangt samen met enerzijds de kans op een instabiliteit, die afneemt naarmate de geuldiepte kleiner is, en anderzijds met de grootte van de inscharing, dus de kans dat de waterkering beschadigd raakt door een instabiliteit; die kans wordt eveneens kleiner bij een kleinere geuldiepte.” (Waterstaat, 2007)
Verder kunnen de geometrie van het voorland en de bestorting nog worden getoetst, waarna nog een geotechnische toets kan worden uitgevoerd.[3]
Als de stabiliteit van het voorland van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen en het dwarsprofiel (geologische opbouw) van het voorland wijzigt niet of nauwelijks, mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als de stabiliteit van het voorland van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen en/of er zijn significante wijzigingen in het dwarsprofiel (geologische opbouw) van het voorland kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Verflauwing van de taludhelling van het voorland: door de helling van het voorland te verflauwen (door bestorten) kunnen steiler wordende vooroevers worden tegengegaan en kunnen zettingsvloeiingen en afschuivingen vrijwel geheel worden voorkomen;

[2] Een nadere toelichting op de berekeningen voor de toetsing van de microstabiliteit wordt niet noodzakelijk geacht aangezien, in het geval van de Afsluitdijk, er geen problemen worden verwacht met betrekking tot de microstabiliteit.
[3] Een nadere toelichting op de berekeningen voor de toetsing van de stabiliteit van het voorland wordt niet noodzakelijk geacht aangezien, in het geval van de Afsluitdijk, er geen problemen worden verwacht met betrekking tot de stabiliteit van het voorland.

- Aanbrengen van een bestorting of een bezinking: door bijvoorbeeld stortsteen of zinkmatten op het voorland aan te brengen kunnen steiler wordende vooroevers worden tegengegaan, hierbij is er echter geen invloed op de verwekingsgevoeligheid van de bodem.

7.10 Stabiliteit bekleding

Het doel van een bekleding op een dijk of oever is, in samenhang met de onderlaag, het grondlichaam te beschermen tegen erosie als gevolg van daarop optredende belastingen. Voor de toetsing van de stabiliteit van een bekleding zal in deze paragraaf alleen worden gekeken naar de golfaanval en stroming op een bekleding. Er is een verscheidenheid aan typen bekleding waarbij hier de aanvaarde dimensioneringsmethoden voor de volgende typen bekleding worden behandeld:

1. gras (klei)
2. losgestorte materialen;
3. verpakte bekledingen;
4. gezette bekledingen en blokkenmatten;
5. plaatbekledingen;
6. asfaltbekledingen;
7. overige bekledingen en materialen.

Deze bekledingen dienen, afhankelijk van de locatie van toepassing te worden getoetst op de volgende punten.

7.10.1 Gras (klei)

Gras is een veelgebruikte en vaak goede dijkbekleding.

Golfaanval

Gras als dijkbekleding komt bij zee- en meerdijken hoofdzakelijk voor op het bovenste deel van het buitentalud, de kruin en het binnentalud en zal onder normale omstandigheden niet in aanraking komen met golven. Dit zal dan ook niet verder worden behandeld.

Stroming

De toetsing op stabiliteit van een grasbekleding bij stroming wordt meegenomen in de toetsing op golfoverslag.

Als de stabiliteit van een grasbekleding van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als de stabiliteit van een grasbekleding van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

- Gewapend gras: door het gras te versterken met een kunststof wapening is het beter bestand tegen erosie;
- Ander type bekleding: door het gras te vervangen door een ander type bekleding is een dijk of dam beter bestand tegen erosie.

7.10.2 Losgestorte materialen

Bij losgestorte materialen kan onderscheid worden gemaakt in aanval door windgolven en aanval door stroming. Dit wordt in de volgende alinea's behandeld.

Golfaanval

Om de stabiliteit van losgestorte materialen te kunnen garanderen onder invloed van golfaanval (brekende golven) op een dijkbekleding van bijvoorbeeld stortsteen wordt voor het bepalen van de nominale diameter vergelijking (7.31) of vergelijking (7.32) gebruikt:

$$\frac{H_{sc}}{\Delta d_{n50}} = 6{,}2P^{0{,}18}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0{,}2}\xi^{-0{,}5} \quad \text{(overstortende brekers)} \quad \text{(Meer, 1988)} \quad (7.31)$$

$$\frac{H_{sc}}{\Delta d_{n50}} = 1{,}0P^{-0{,}13}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0{,}2}\xi^{P}\sqrt{\cot\alpha} \quad \text{(oplopende brekers)} \quad \text{(Meer, 1988)} \quad (7.32)$$

met: $S = \frac{A_e}{d_{n50}^2}$ en $d_{n50} = \left(\frac{M_{50}}{\rho_s}\right)^{\frac{1}{3}}$

waarin:

H_{sc}	=	significante golfhoogte	[m]
Δ	=	relatieve dichtheid	[-]
d_{n50}	=	nominale diameter	[m]
S	=	schadefactor	[-]
N	=	aantal golven	[-]
ξ	=	breker parameter	[-]
α	=	hoek van het talud	[°]
P	=	doorlatendheidscoëfficiënt	[-]
A_e	=	schadeoppervlak	[m^2]
M_{50}	=	50%-waarde van de massaverdeling	[kg]

De overgang tussen de vergelijking (7.31) en vergelijking (7.32) kan worden gevonden door deze op elkaar te delen:

$$\xi_{overgang} = \left(6{,}2P^{0{,}31}\sqrt{\tan\alpha}\right)^{\left(\frac{1}{P+0{,}5}\right)} \quad \text{(Meer, 1988)} \quad (7.33)$$

Stroming

Om de stabiliteit van losgestorte materialen te kunnen garanderen bij een bepaalde extreme waarde voor de stroomsnelheid over een dijkbekleding van bijvoorbeeld stortsteen wordt voor het bepalen van de nominale diameter vergelijking (7.34) gebruikt:

$$d_{n50} = \frac{\overline{u_c}^2}{K_s \psi_c \Delta C^2} \quad \text{(Schiereck, 2000)} \quad (7.34)$$

met: $C = 18\log\left(\frac{12R}{k_r}\right)$, $K_s = \frac{\sin(\phi-\alpha)}{\sin\phi}$ (stroming parallel aan talud) en $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$

met: $k_r = 2d_{n50}$

waarin:

d_{n50}	=	nominale diameter	[m]
$\overline{u_c}$	=	kritische snelheid gemiddeld over de ruimte	[m/s]
ψ_c	=	Shields-parameter	[-]
Δ	=	relatieve dichtheid	[-]
C	=	Chezy coëfficiënt	[$m^{1/2}$/s]
R	=	hydraulische straal	[m]
k_r	=	(equivalente) ruwheid van de bodem	[m]
ϕ	=	natuurlijke hellingshoek	[-]
α	=	hoek van het talud	[-]
ρ_s	=	dichtheid van het sediment	[kg/m^3]
ρ_w	=	dichtheid van water	[kg/m^3]

De stabiliteit van een dijkbekleding van losgestorte materialen is voor de huidige situatie niet getoetst, echter is dit wel noodzakelijk wanneer in een integraal ontwerp losgestorte materialen worden toegepast.

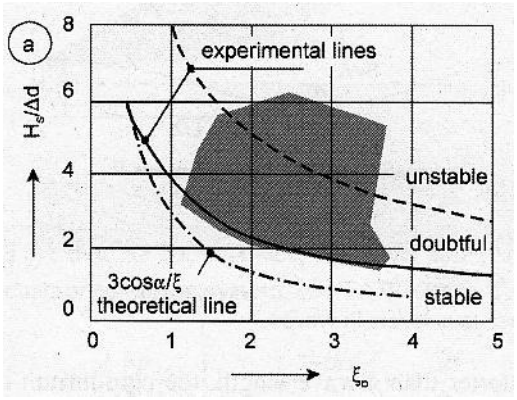
7.10.3 Verpakte bekledingen

Onder verpakte bekledingen vallen gabions, steenmatrassen, geotextielmatten gevuld met zand, grind of cement. Vanwege de diversiteit in verpakte bekledingen zal hier niet verder op worden ingegaan.
De stabiliteit van verpakte dijkbekleding is voor de huidige situatie niet getoetst, echter is dit wel noodzakelijk wanneer in een integraal ontwerp verpakte dijkbekleding wordt toegepast.

7.10.4 Gezette bekledingen en blokkenmatten

Golfaanval

Om de stabiliteit van gezette bekledingen te kunnen garanderen onder invloed van golfaanval (brekende golven) wordt voor het bepalen van de laagdikte de testresultaten zoals weergegeven in Figuur 7.3 gebruikt.



Figuur 7.3 Testresultaten voor gezette blokken op een filterlaag (Schiereck, 2000)

De trend van de getrokken lijn van Figuur 7.3 kan worden weergegeven door:

$$\frac{H_s}{\Delta d} \propto \left(\frac{d}{\Lambda \xi_p} \right)^{0,67} \qquad \text{(Schiereck, 2000)} \qquad (7.35)$$

waarin:

d	=	laagdikte van de bekleding	[m]
Λ	=	leklengte	[m]
ξ_p	=	brekerparameter gerelateerd aan de piekgolfperiode	[-]

Stroming

Om de stabiliteit van losgestorte materialen te kunnen garanderen bij een bepaalde extreme waarde voor de stroomsnelheid over een dijkbekleding van gezette bekledingen wordt voor het bepalen van de nominale diameter vergelijking (7.36) gebruikt:

$$\Delta D \geq \frac{1}{4}\left(\text{ontwerppeil} + z_{2\%} - h_{kr}\right) \qquad \text{(TAW, 2003)} \qquad (7.36)$$

waarin:

Δ	=	relatieve dichtheid toplaagelementen	[-]
D	=	dikte toplaag (= hoogte toplaagelementen)	[m]
$z_{2\%}$	=	golfoploopniveau	[m]
h_{kr}	=	kruinhoogte ter plaatse van de buitenkruinlijn op de peildatum	[m+NAP]

Als de stabiliteit van een gezette bekleding van een dijk of dam onder invloed van golfaanval bij toetsing van de huidige situatie voldoet aan de veiligheidsnormen mag worden verondersteld dat aan de randvoorwaarden voor dit toetspunt wordt voldaan.
Als de stabiliteit van een gezette bekleding van een dijk of dam bij toetsing van de huidige situatie niet voldoet aan de veiligheidsnormen kunnen de volgende verbeteringsmaatregelen genomen worden:

De stabiliteit van een dijkbekleding van gezette bekledingen onder invloed van golfaanval is voor de huidige situatie niet getoetst, echter is dit wel noodzakelijk wanneer in een integraal ontwerp losgestorte materialen worden toegepast.

7.10.5 Plaatbekledingen

Golfaanval

Plaatbekledingen worden in Nederland weinig toegepast in de golfklapzone, aangezien de ondergrond onder de plaatbekleding gemakkelijk kan eroderen en moeilijk is te controleren zal er in dit onderzoek geen aandacht worden besteed aan plaatbekledingen die kunnen worden blootgesteld aan golfaanval.

Stroming

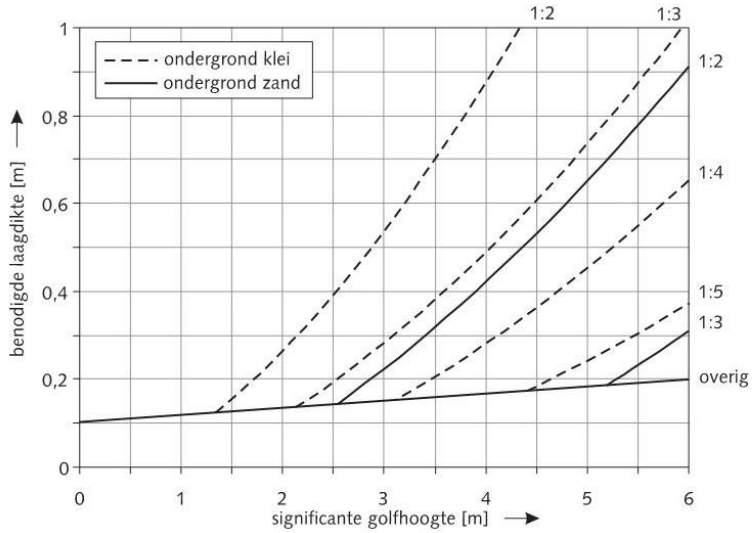
Er wordt van uitgegaan dat een betonbekleding onder normale omstandigheden goed bestand is tegen stromend water.

De stabiliteit van een dijkbekleding van beton is bij toetsing van de huidige situatie niet getoetst, echter is dit wel noodzakelijk wanneer in een integraal ontwerp asfalt als dijkbekleding wordt toegepast.

7.10.6 Asfaltbekledingen

Golfaanval

Om de stabiliteit van asfalt bij golfaanval te kunnen garanderen wordt voor het bepalen van de benodigde laagdikte de volgende grafiek gebruikt:



Figuur 7.4 Grafiek voor het ontwerpen van een waterbouwasfaltbeton bekleding op golfklappen

Stroming

Er wordt van uitgegaan dat een asfaltbekleding (open steenasfalt) onder normale omstandigheden goed bestand is tegen stromend water met stroomsnelheden tot 6 m/s. De minimale laagdikte voor waterbouwasfaltbeton op een ondergrond van zand bedraagt 0,10 m en op een ondergrond van klei 0,15 m.

De stabiliteit van een dijkbekleding van asfalt is bij toetsing van de huidige situatie niet getoetst, echter is dit wel noodzakelijk wanneer in een integraal ontwerp asfalt als dijkbekleding wordt toegepast.

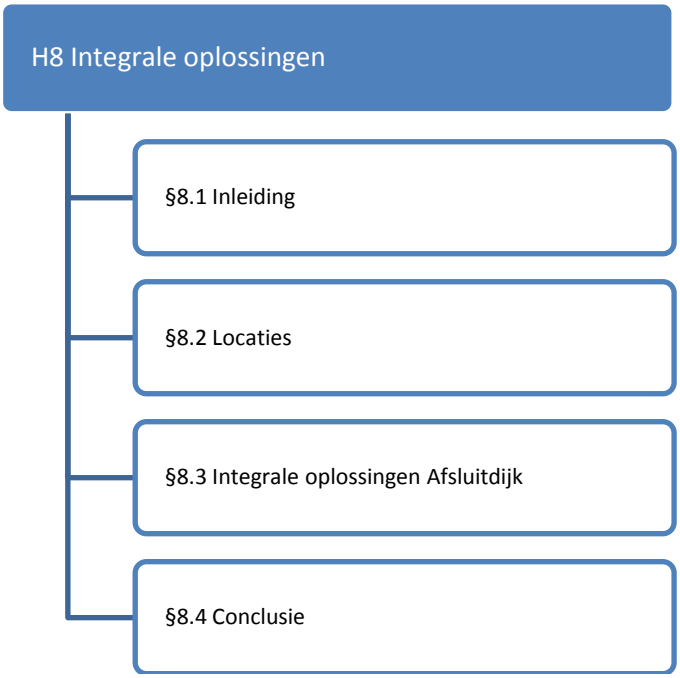
7.10.7 Overige bekledingen en materialen

De diversiteit in overige bekledingen en materialen is groot, waardoor er niet een vergelijkbare toetsmethode aangegeven kan worden voor dit type bekledingen.

7.11 Conclusie

Tekst voor deze paragraaf volgt nog…

8 Integrale oplossingen



Figuur 8.1 Indeling hoofdstuk 7

8.1 Inleiding

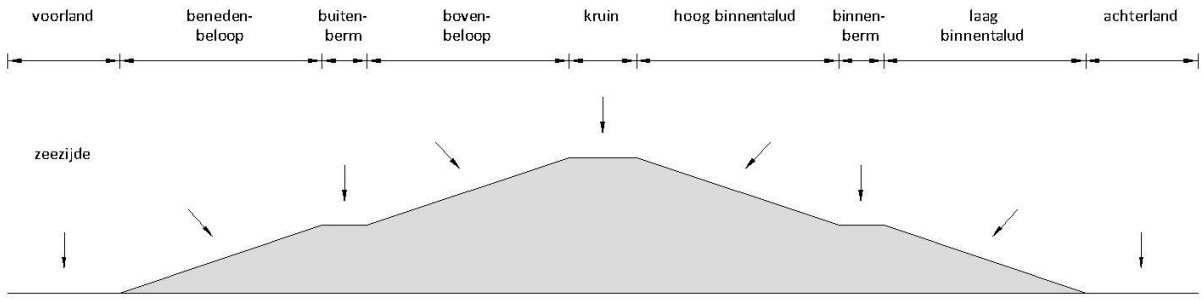
Eerder in dit rapport zijn oplossingen voor verbetering van een dijk (hoofdstuk 3), de bevestigingsmogelijkheden voor zonnepanelen (hoofdstuk 5) en de toetsing van de integrale oplossingen (hoofdstuk 7) besproken. In dit hoofdstuk zullen integrale oplossingen worden gecreëerd en getoetst. Allereerst zullen diverse locaties in het dwarsprofiel van een dijklichaam worden beschouwd (paragraaf 8.2). Vervolgens zullen drie integrale oplossingen worden gegeven en worden getoetst aan de hand van de gestelde randvoorwaarden en toetspunten (paragraaf 8.3).

8.2 Locaties

Voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam zijn verschillende locaties in het dwarsprofiel mogelijk. Hierbij kunnen de zonnepanelen verschillende functies vervullen. Er kan onderscheid worden gemaakt in de volgende locaties in het dwarsprofiel:

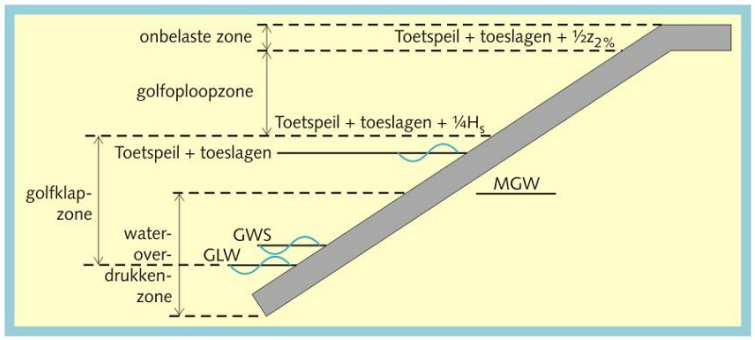
A. voorland;
B. benedenbeloop;
C. buitenberm;
D. bovenbeloop;
E. kruin;
F. hoog binnentalud;
G. binnenberm;
H. laag binnentalud;
I. achterland

Zie Figuur 8.2 voor de te onderzoeken locaties voor het plaatsen van zonnepanelen.



Figuur 8.2 Te onderzoeken locaties (aangegeven met pijlen) voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam

Verder kan het buitentalud (benedenbeloop, buitenberm en bovenbeloop) nog onderverdeeld worden in verschillende zones voor de belasting (zie Figuur 8.3). Het onderste deel van het buitentalud wordt direct belast door golven (golfklapzone), een hoger deel van het buitentalud wordt indirect belast door golven (golfoploopzone) en het bovenste deel van het buitentalud wordt onder normale omstandigheden helemaal niet belast door golven (onbelaste zone).



Figuur 8.3 Schematische weergave van de belastingzones op het buitentalud (Waterstaat, 2007)

Per locatie in het dwarsprofiel wordt bekeken of er zonnepanelen geplaatst kunnen worden, en of, en in welke mate zonnepanelen een toegevoegde waarde kunnen geven aan de waterkerende functies van de elementen.

8.2.1 Voorland

Het voorland staat in veel situaties een groot deel van de tijd onder water. Deze locatie is daardoor geen optie voor het plaatsen van zonnepanelen aangezien zonnepanelen niet volledig onder water mogen komen te staan.

8.2.2 Benedenbeloop

Het benedenbeloop staat bij veel dijken een groot deel van de tijd onder water. Verder wordt dit deel van het buitentalud direct belast door golven (het benedenbeloop bevindt zich deels in de golfklapzone, zie Figuur 8.3). Het benedenbeloop is daardoor geen optie voor het plaatsen van zonnepanelen, aangezien zonnepanelen niet volledig onder water mogen komen te staan en niet bestand zijn tegen drukken ten gevolge van golfklappen.

8.2.3 Buitenberm

Voor de buitenberm geldt hetzelfde als voor het benedenbeloop.

8.2.4 Bovenbeloop

Het bovenbeloop kan verdeeld worden in de golfklapzone, de golfoploopzone en de onbelaste zone. De golfklapzone staat tijdens maatgevende hydraulische omstandigheden grotendeels onder water en wordt hierbij ook direct belast door golven. De golfklapzone is daardoor geen optie voor het plaatsen van zonnepanelen.

De golfoploopzone staat tijdens maatgevende hydraulische omstandigheden niet onder water, maar wordt wel indirect belast door golven. Zonnepanelen kunnen op dit deel van het buitentalud geplaatst worden indien deze niet in contact komen met de golfoploop (bijvoorbeeld door deze, met behulp van een constructie, op enige afstand, parallel aan het buitentalud te plaatsen). Echter is er een grote kans op het defect raken van de zonnepanelen ten gevolge van de grote hoeveelheden water in de nabijheid van de zonnepanelen en kan de overige apparatuur worden belast met de golfoploop. De golfoploopzone is daardoor geen optie voor het plaatsen van zonnepanelen.
De onbelaste zone staat tijdens maatgevende hydraulische omstandigheden niet onder water en wordt niet belast door golven. De onbelaste zone is daardoor een optie voor het plaatsen van zonnepanelen.
De mogelijke functies die zonnepanelen bij plaatsing op het buitentalud (in de golfoploopzone) in kunnen nemen zijn het duurzaam omzetten van energie en het fungeren als dijkbekleding.
De voor- en nadelen van toepassing van zonnepanelen in de onbelaste zone op het buitentalud zijn:

+ Zonnepanelen kunnen functioneren als dijkbekleding;
− Zonnepanelen hebben een glad oppervlak (glas), echter ligt bij de bekleding van het buitentalud van een dijk meestal de voorkeur bij een ruw oppervlak aangezien dit een reductie van de golfoploop en golfoverslag oplevert. Als zonnepanelen als dijkbekleding worden toegepast dient rekening te worden gehouden met een hogere ruwheidscoëfficiënt (i.e. een lagere ruwheid). Een gevolg kan zijn dat een hogere kruin noodzakelijk is, of maatregelen ter bescherming van de kruin en het binnentalud noodzakelijk zijn;
− Door toepassing van zonnepanelen kan de doorlatendheid van de toplaag beïnvloed worden doordat het water zich concentreert bij de locaties waar de zonnepanelen aan elkaar grenzen. Voorkomen dient te worden dat overdrukken onder de bekleding ontstaan, of deze dient zo ontworpen te worden zodat deze hiertegen bestand is. Dit is afhankelijk van de al aanwezige bekleding van het buitentalud. Verder dient te worden voorkomen dat op deze plekken erosievorming ontstaat;
− De kans op contact van zonnepanelen met (zout)water is groter dan bijvoorbeeld bij toepassing van zonnepanelen aan de binnenzijde van een dijk. Het gevolg kan zijn dat apparatuur voor de zonnepanelen mogelijk eerder defect kan raken, bijvoorbeeld ten gevolge van (versnelde) corrosievorming door zoutwater.

8.2.5 Kruin

De kruin wordt onder maatgevende omstandigheden alleen belast met golfoverslag en is daardoor een optie voor het plaatsen van zonnepanelen. Als de kruin bijvoorbeeld ook wordt gebruikt als inspectiepad dient de hiervoor vastgestelde ruimte wel vrij te blijven en bij te weinig ruimte is het niet mogelijk zonnepanelen op de kruin te plaatsen.
De hele kruin kan worden bekleed met zonnepanelen, waarbij zonnepanelen kunnen functioneren als duurzame energieomzetter en dijkbekleding.
De voor- en nadelen van toepassing van zonnepanelen op de kruin zijn:

+ Zonnepanelen kunnen functioneren als dijkbekleding;
− Zonnepanelen hebben een glad oppervlak (glas), echter ligt bij de bekleding van de kruin van een dijk meestal de voorkeur bij een ruw oppervlak aangezien dit een reductie in de stroomsnelheden van de golfoverslag oplevert. Als zonnepanelen als dijkbekleding worden toegepast dient rekening te worden gehouden met een hogere ruwheidscoëfficiënt (i.e. een lagere ruwheid). Een gevolg kan zijn dat maatregelen ter bescherming van de kruin en het binnentalud noodzakelijk zijn;
− Door toepassing van zonnepanelen wordt de infiltratie van water bemoeilijkt en concentreert deze zich bij de locaties waar de zonnepanelen aan elkaar grenzen. Voorkomen dient te worden dat op deze plekken erosievorming ontstaat;
− De kans op contact van zonnepanelen met (zout)water is groter dan bijvoorbeeld bij toepassing van zonnepanelen aan de binnenzijde van een dijk. Het gevolg kan zijn dat apparatuur voor de

zonnepanelen mogelijk eerder defect kan raken, bijvoorbeeld ten gevolge van (versnelde) corrosievorming door zoutwater.

8.2.6 Hoog binnentalud

Het bovenste deel van het binnentalud wordt onder maatgevende omstandigheden alleen belast met golfoverslag en is daardoor een optie voor het plaatsen van zonnepanelen.
Het gehele bovenste deel van het binnentalud kan worden bekleed met zonnepanelen, waarbij zonnepanelen kunnen functioneren als duurzame energieomzetter en dijkbekleding.
De voor- en nadelen van toepassing van zonnepanelen op het bovenste deel van het binnentalud zijn:

+ Zonnepanelen kunnen functioneren als dijkbekleding;
+ De kans op contact van zonnepanelen met (zout)water is kleiner dan bijvoorbeeld bij toepassing van zonnepanelen aan de buitenzijde of op de kruin van een dijk.
− Zonnepanelen hebben een glad oppervlak (glas), echter ligt bij de bekleding van het binnentalud van een dijk de voorkeur bij een ruw oppervlak aangezien dit een reductie van de stroomsnelheid van eventueel afstromend water op kan leveren. Als zonnepanelen als dijkbekleding worden toegepast dient rekening te worden gehouden met een hogere ruwheidscoëfficiënt (dit is een lagere ruwheid). Een gevolg kan zijn dat maatregelen ter bescherming (van de overige delen) van het binnentalud noodzakelijk zijn;
− Door toepassing van zonnepanelen wordt de infiltratie van water bemoeilijkt en concentreert deze zich bij de locaties waar de zonnepanelen aan elkaar grenzen. Voorkomen dient te worden dat op deze plekken erosievorming ontstaat.

8.2.7 Binnenberm

Voor de binnenberm geldt hetzelfde als voor het hoge binnentalud. Echter kan het zijn dat er geen ruimte is voor het plaatsen van zonnepanelen op de binnenberm doordat de binnenberm een andere functie vervult, bijvoorbeeld een verkeersfunctie.

8.2.8 Laag binnentalud

Voor het lage binnentalud geldt hetzelfde als voor het hoge binnentalud. Dit is alleen geldig indien het achterland bijvoorbeeld een polder is. Is het achterland bijvoorbeeld een meer, dan geldt voor het lage binnentalud hetzelfde als voor het benedenbeloop.

8.2.9 Achterland

Afhankelijk van de inrichting van het achterland kan deze locatie een optie zijn voor het plaatsen van zonnepanelen. Als het achterland bijvoorbeeld een polder is, is het plaatsen van zonnepanelen vergelijkbaar met het plaatsen van zonnepanelen op een stuk land. Is het achterland bijvoorbeeld een meer dan geldt hetzelfde als het voorland.
Er dient opgemerkt te worden dat bij falen of bezwijken van een dijk het achterland meestal de eerste locatie is die onder water komt te staan.

De mogelijke locaties voor de toepassing van zonnepanelen zijn de onbelaste zone van het bovenbeloop (buitentalud), de kruin, het hoge binnentalud, de binnenberm (afhankelijk van het gebruik van de binnenberm), het lage binnentalud (afhankelijk van de inrichting van het achterland) en het achterland (afhankelijk van de inrichting hiervan).

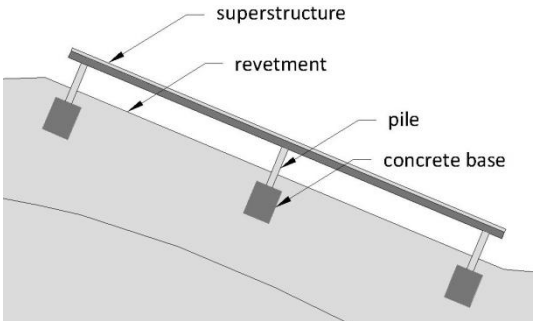
8.3 Bevestiging zonnepanelen

In deze paragraaf worden de mogelijkheden voor de bevestiging van zonnepanelen op een dijklichaam bekeken. Om de zonnepanelen aan een dijklichaam te bevestigen zullen een (lichte) fundering en een opbouw benodigd zijn. Voor de fundering wordt hierbij onderscheid gemaakt

tussen een palenfundering en een fundering op basis van een dijkbekleding. Deze twee type bevestigingen zullen hieronder worden toegelicht en de voor- en nadelen worden besproken.

8.3.1 Palenfundering

Bij een palenfundering worden zonnepanelen met (elkaar verbonden) palen en/of een raamwerk op een dijklichaam geplaatst (zie Figuur 5.3 en Figuur 8.4). Het betreft hier palen met een lengte in de ordegrootte van enkele meters en een diameter in de ordegrootte van minder dan een decimeter.



Figuur 8.4 Voorbeeld van een palenfundering

Palen kunnen bestaan uit de materialen beton, hout en staal. Per materiaalsoort wordt bekeken of dit geschikt is voor toepassing als fundering in een dijklichaam voor zonnepanelen:

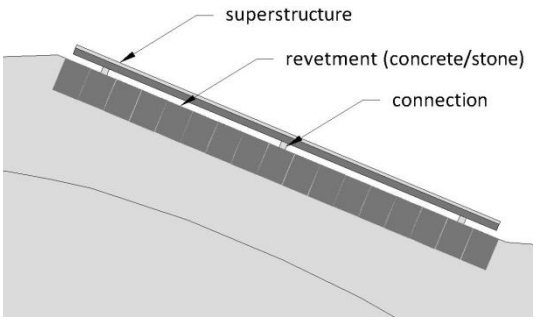
- Beton: de toepassing van palen van beton is een optie aangezien het materiaal beton goed bestand is tegen de optredende omstandigheden;
- Hout: palen van hout (eventueel in combinatie met een opzetstuk van beton) kunnen alleen gebruikt worden mits deze permanent onder het freatisch vlak staan. Aangezien dit bij dijken niet gegarandeerd kan worden, zijn houten palen als fundering voor zonnepanelen geen optie;
- Staal: palen van staal (eventueel met een voet van beton) kunnen alleen gebruikt worden mits deze goed geconserveerd zijn, zowel onder als boven het maaiveld. De toepassing van stalen palen als fundering is een optie, echter dient er wel rekening mee gehouden te worden dat controle van de conservering van de stalen palen onder het maaiveld niet goed is uit te voeren.

De voor- en nadelen van een palenfundering voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam zijn:

\+ Eenvoudig te plaatsen constructie;
− Palen dienen deels in het dijklichaam te worden geplaatst en kunnen hierbij mogelijk afsluitende (klei)lagen doorkruisen, waardoor een grotere kans op falen (erosie, macro- en micro-instabiliteit) aanwezig is;
− Indien de huidige dijkbekleding een levende bekleding is en de zonnepanelen in dit geval geen functie hebben als dijkbekleding dient de huidige dijkbekleding te worden vervangen;
− Zonnepanelen en fundering kunnen niet voorgemonteerd worden aangeleverd en geplaatst zoals het geval is bij een geprefabriceerde betonconstructie.

8.3.2 Dijkbekleding als fundering

Zonnepanelen kunnen ook op een fundering bestaande uit een dijkbekleding worden geplaatst (zie Figuur 8.5). De dijkbekleding dient uit een steenachtig materiaal te bestaan. De bekleding dient een (enigszins) vlak oppervlak en bevestigingsmogelijkheden te hebben, aangezien hierop zonnepanelen geplaatst dienen te worden.



Figuur 8.5 Voorbeeld van dijkbekleding als fundering

Er zijn vele typen dijkbekleding beschikbaar (zie appendix G), echter komen voor het integrale ontwerp maar enkele bekledingstypen in aanmerking aangezien deze ook de verbinding tussen ondergrond en zonnepaneel moeten kunnen vormen. De overige typen bekleding komen niet in aanmerking omdat deze bijvoorbeeld geen goede bevestigingsmogelijkheden voor zonnepanelen bieden. De bekledingstypen die in aanmerking komen zijn:

- gezette bekledingen en blokkenmatten;
- plaatbekledingen;
- asfaltbekledingen.

Deze drie type bekledingen zullen hieronder nader worden toegelicht. Hierbij worden de mogelijke locaties voor toepassing (paragraaf 8.2), de bevestigingsmogelijkheden, de uitvoering (plaatsing in geprefabriceerde vorm) en de materiaalkosten bekeken.

Gezette bekledingen en blokkenmatten

Gezette bekledingen en blokkenmatten bestaan uit elementen met een oppervlakte kleiner dan ongeveer 1 m^2 en worden bijeengehouden door de zwaartekracht en de onderlinge wrijving tussen de zuilen of blokken. Er kan voor gezette bekledingen en blokkenmatten een onderverdeling worden gemaakt in:

- ingeklemde stenen (zuilen en blokken);
- blokkenmatten (open of gesloten blokken verbonden met een geotextiel of kabels);
- interlock stenen (stenen die in elkaar haken).

Zonnepanelen kunnen goed op gezette bekledingen en blokkenmatten worden bevestigd, mits deze een vlakke bovenzijde hebben. Indien het niet mogelijk (om constructieve of fysische redenen) is om de opbouw met zonnepanelen op één bekledingselement van een dijk te bevestigen, kan bijvoorbeeld worden gekozen voor de bevestiging aan meerdere bekledingselementen. Bijvoorbeeld bij een bekleding met een regelmatig patroon is dit goed realiseerbaar. Een belangrijk punt is de kans op ongelijke zetting van dit type bekleding: door ongelijke zettingen kunnen ongewenste spanningen in de opbouw en zonnepanelen ontstaan. Hier dient bij de keuze van het type bekleding rekening mee te worden gehouden.
Gezette bekledingen en blokkenmatten kunnen in geprefabriceerde vorm machinaal worden aangebracht, echter is het niet mogelijk om dit te combineren met van tevoren aangebrachte zonnepanelen.

Plaatbekledingen

Plaatbekledingen zijn elementen met een geringe dikte in verhouding tot de lengte en de breedte, die hun stabiliteit ontlenen aan het gegeven dat momenten en dwarskrachten inwendig kunnen worden overgedragen (belastingspreiding). Er kan hierbij een onderverdeling worden gemaakt in:

- open plaatbekledingen: gestorte homogene plaat van open colloïdaal beton;
- Dichte plaatbekledingen:
  a. Homogene plaat van normaal beton, geprefabriceerd of in het werk gestort;
  b. Vol en zat gepenetreerde breuksteen met colloïdaal beton.

Zonnepanelen kunnen zeer goed op plaatbekledingen worden bevestigd, aangezien deze uit één geheel bestaan. Verder kan de plaatbekleding (bij het ontwerp) worden aangepast voor de bevestiging van zonnepanelen.
Plaatbekledingen kunnen in geprefabriceerde vorm machinaal worden aangebracht, waarbij zonnepanelen al kunnen zijn voorgemonteerd.

Asfaltbekledingen

Asfaltbekledingen zijn in sommige opzichten vergelijkbaar met plaatbekledingen. Asfaltbekledingen omvatten de volgende typen: asfaltbeton, mastiek, dicht steenasfalt, open geprefabriceerde steenasfaltmatten (eventueel) met wapening, op een geotextiel als drager, open steenasfalt, zandasfalt (eigenlijk alleen in onderlaag), breuksteen (gepenetreerd met asfalt, vol en zat), baksteen/betonsteen/basalt (gepenetreerd met asfalt, vol en zat).
Zonnepanelen kunnen goed op asfaltbekledingen worden bevestigd, mits de gebruikte steensoort in of onder (bij stenen gepenetreerd met asfalt) het asfalt een niet te grote afmeting heeft zodat er een vlakke bovenzijde aanwezig is. Een belangrijk punt is de kans op ongelijke zetting van dit type bekleding: door ongelijke zettingen kunnen ongewenste spanningen in de opbouw en zonnepanelen ontstaan. Hier dient bij de keuze van het type bekleding rekening mee te worden gehouden. Asfaltbekledingen kunnen in geprefabriceerde vorm machinaal worden aangebracht, echter is het niet mogelijk om dit te combineren met van tevoren aangebrachte zonnepanelen.

In Tabel 8.1 worden de kenmerken van de drie bekledingstypen met elkaar vergeleken. Tevens zijn in Tabel 8.1 de kosten (grove schatting) voor het bekledingsmateriaal vermeld.

Tabel 8.1 Vergelijking bekledingsmaterialen voor toepassing binnentalud

aspect	asfaltbekledingen	betonbekledingen (prefab)	gezette bekledingen
Bevestigingsmogelijkheden zonnepanelen	+	+	+
ongelijkmatige zetting (bekleding)[1]	+	-	+
uitvoering	-	+	-
materiaalkosten	€ 50,-/m^3	€ 100,-/m^3	€ 100,-/m^3

[1]: als een bekleding ongelijkmatige zettingen goed kan volgen (aangeduid met een '+') heeft dit een negatieve invloed op de zonnepanelen aangezien er dan spanningen in de zonnepanelen kunnen ontstaan

Nu de benodigde aspecten van een dijkbekleding als fundering voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam zijn besproken, kunnen de voor- en nadelen hiervan worden gegeven:

+ Eenvoudig te plaatsen constructie (in het geval van een geprefabriceerde constructie);
+ Zonnepanelen kunnen mogelijk op de huidige dijkbekleding worden bevestigd (in het geval de huidige dijkbekleding een plaatbekleding van beton betreft);
+ Indien de huidige dijkbekleding niet voldoet aan de veiligheidsnormen en er dient een nieuwe dijkbekleding aangebracht te worden, kan deze direct gecombineerd worden met zonnepanelen;
+ De kans dat afsluitende (klei)lagen doorkruist worden is gering, aangezien de dikte van deze laag meestal groter dan een meter is. Hierdoor is de kans op falen (macro- en micro-instabiliteit) ook gering;
+ Zonnepanelen kunnen al voorgemonteerd worden op een geprefabriceerde plaatfundering
− In het werk aangebrachte dijkbekledingen (asfalt en ter plaatse aangebracht beton) vergen meer tijd.

Geconcludeerd kan worden dat een betonbekleding (open of gesloten) voor toepassing in combinatie met zonnepanelen de voorkeur verdient, aangezien de ongelijkmatige zetting en uitvoering (mogelijkheid tot het plaatsen van bekleding en zonnepaneel in een handeling) belangrijke aspecten zijn. Dat deze aspecten belangrijk zijn is, in het geval van de Afsluitdijk, een gevolg van de noodzakelijkheid van een nieuwe dijkbekleding voor het binnentalud van de Afsluitdijk.

Doorlatendheid dijkbekleding

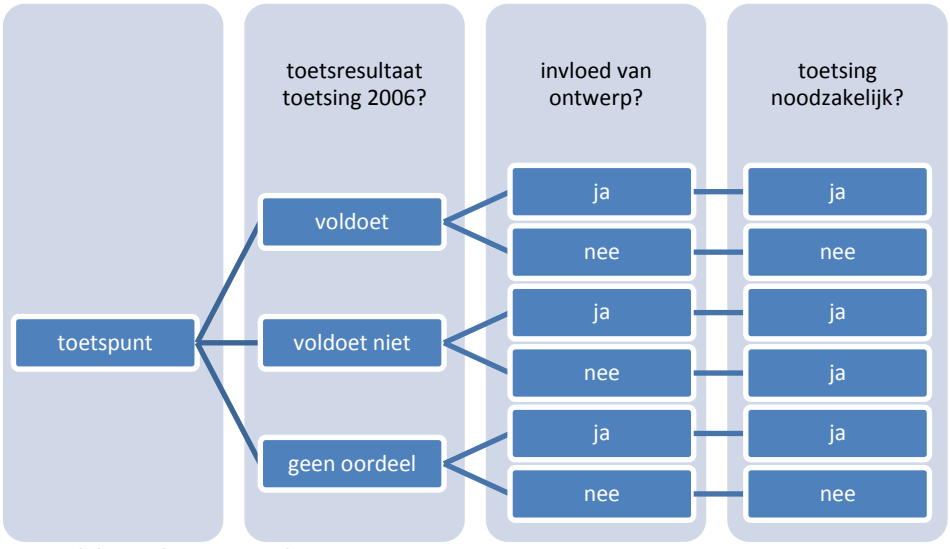
De doorlatendheid van verschillende typen dijkbekleding kan sterk variëren. Als een nieuwe dijkbekleding aangebracht dient te worden, dient ook de keuze gemaakt te worden tussen een open of een gesloten type bekleding. De toepassing van een open of gesloten bekleding is geheel afhankelijk van de locatie in het dwarsprofiel. De locatie bepaalt bijvoorbeeld of er invloed is van golfaanval. Ook de ondergrond (zand of klei, met of zonder filterlaag) waar een bekleding op geplaatst wordt heeft invloed op deze keuze. Als de bekleding van een dijk wordt vervangen kan het, indien de huidige bekleding goed functioneert, een goede keuze zijn hetzelfde type bekleding of een bekleding met dezelfde eigenschappen als de huidige bekleding toe te passen.
De voor- en nadelen van een open en gesloten plaatbekleding zijn:

- Bij een plaatbekleding met een voldoende open structuur wordt de opbouw van overdrukken onder de bekleding voorkomen;
- Er kan een behoorlijke materiaalbesparing plaatsvinden door, op locaties waar lage eisen aan de bekleding worden gesteld, delen van de bekleding weg te laten. Er wordt in dit geval gedoeld op de toepassing van een raamwerk van beton (op een filterlaag) in plaats van een plaat van beton.

8.4 Integrale oplossingen Afsluitdijk

In deze paragraaf worden het integrale ontwerp besproken. Eerst zullen de algemene kenmerken van het integrale ontwerp worden besproken. Het integrale ontwerp zal daarna worden getoetst aan de toetspunten (hoofdstuk 7). Verder wordt een schatting van de investeringskosten gemaakt en wordt bekeken hoe uitvoering gerealiseerd kan worden.

Voor ieder toetspunt wordt bekeken wat het toetsresultaat was van de vijfjaarlijkse toetsing in 2006, waarna de invloeden van een integrale oplossing op de huidige situatie worden bekeken. Hieruit blijkt of toetsing op een voorgenoemd punt voor een integrale oplossing noodzakelijk is. Het proces zoals hiervoor beschreven, is schematisch weergegeven in Figuur 8.6.



Figuur 8.6 Beoordelingsschema aanpak toetsing voor een ontwerp

8.4.1 Algemene kenmerken integrale ontwerp

In hoofdstuk 3 zijn verschillende verbeteringsmaatregelen behandeld. Het bleek lastig aan te geven wat precies de beste oplossingsrichtingen voor verbetering van de Afsluitdijk zijn, doordat dit deels afhankelijk is van de visie voor het omliggende gebied. Wel kunnen de oplossingsrichtingen in twee typen worden verdeeld:

1. kruinhoogte voldoet: dit betreft de oplossingsrichtingen waarbij de kruin wordt verhoogd. Voor het integraal ontwerp zal met drie overslagdebieten (0,1, 1 en 10 l/s/m) gerekend worden.

Voorbeelden van oplossingsrichtingen die tot dit type behoren zijn een dijk over de oude dijk en dijkverbetering binnen- of buitenwaarts;
2. kruinhoogte voldoet niet: dit betreft de oplossingsrichtingen waarbij de kruinhoogte gelijk blijft of in kleine mate wordt verhoogd en er tevens andere maatregelen worden genomen. Voor het overslagdebiet mag 40 l/s/m aangehouden worden. Voorbeelden van oplossingsrichtingen die tot dit type behoren zijn een overslagbestendige dijk en de toepassing van kunstmatige riffen.

Onafhankelijk van de verbeteringsmaatregelen kunnen de integrale oplossingen, op basis van de locatie op het dijklichaam van de Afsluitdijk (zie paragraaf 8.2), worden verdeeld in twee groepen:
1. bovenste deel buitentalud (onbelaste zone);
2. hoge binnentalud.

Voor de Afsluitdijk zijn de binnenberm, het lage binnentalud en het achterland van de Afsluitdijk geen optie voor het plaatsen van zonnepanelen door de aanwezigheid van rijksweg A7 en het IJsselmeer. De kruin is ook geen optie voor het plaatsen van zonnepanelen aangezien deze toegankelijk dient te blijven voor onderhoud en inspectie van de waterkering.

Voor het integrale ontwerp worden dus voor twee locaties in het dwarsprofiel telkens vier verschillende overslagdebieten getoetst. Uit appendix H blijkt dat bij lage overslagdebieten (0,1 en 1 l/s/m) ter plaatse van de twee genoemde locaties een zwaar uitgevoerde bekleding geen noodzaak is. Aangezien er dan weinig golfoverslag aanwezig is, wordt de dijkbekleding niet zwaar belast. Dit betekent voor het integrale ontwerp dat bij een overslagdebiet van 0,1 en 1 l/s/m kan worden volstaan met de minimale eisen voor de dijkbekleding op het bovenste deel van het buitentalud (onbelaste zone) en het hoge binnentalud. De beschikbaarheid en randvoorwaarden voor toepassing zullen dan maatgevend zijn.

Voor het integrale ontwerp kan een gestandaardiseerd dwarsprofiel worden gebruikt waarmee de verschillende locaties en overslagdebieten kunnen worden getoetst. Dit mag worden gedaan omdat het principe van de plaatsing van zonnepanelen voor de verschillende oplossingsrichtingen hetzelfde blijft. Voor het gestandaardiseerde dwarsprofiel worden ongeveer dezelfde taludhellingen als in de huidige situatie aangehouden (of zoals deze zouden behoren te zijn). Dit betekent 1:4 voor het buitentalud en 1:3 voor het binnentalud. Verder zal voor het onderste deel van het buitentalud en de berm (hoogte op SWL) een bekleding van breuksteen (stortsteen) met een ruwheidsfactor van 0,55 worden aangehouden. Voor het bovenste deel van het buitentalud wordt een bekleding van basalt/basalton met beide een ruwheidsfactor van 0,90 worden aangehouden. Het gestandaardiseerde dwarsprofiel is weergegeven in Figuur 8.7.



Figuur 8.7 Gestandaardiseerd dwarsprofiel

Het integrale ontwerp zal worden getoetst aan de hand van de toetspunten zoals besproken in hoofdstuk 7. Niet alle op alle toetspunten dient te worden getoetst. Een overzicht hiervan is weergegeven in Tabel 8.2.

Tabel 8.2 Invloed integrale ontwerp op toetspunten

toetspunt	toetsresultaat 2006	invloed van ontwerp?	toetsing noodzakelijk?
golfoploop en golfoverslag	voldoet niet	ja	ja
kruinhoogte	voldoet niet	ja	ja
laagdikte en stroomsnelheid van overslag	n.v.t.	ja	ja
piping en heave	voldoet	nee	nee
macrostabiliteit binnenwaarts	voldoet	nee	nee
macrostabiliteit buitenwaarts	voldoet	nee	nee
microstabiliteit	voldoet	nee	nee
stabiliteit voorland	voldoet	nee	nee
stabiliteit bekleding	voldoet	ja	ja

In de volgende alinea's wordt het ontwerp op de noodzakelijke punten getoetst.

Golfoploophoogte en golfoverslaghoogte

Allereerst worden de golfoploophoogte en golfoverslaghoogte berekend aangezien deze waarden benodigd zijn om de minimaal benodigde kruinhoogte te kunnen vaststellen. De golfoploophoogte en golfoverslaghoogte worden vastgesteld met vergelijking (7.2) tot en met vergelijking (7.5). In appendix T is de berekening van de golfoploophoogte en golfoverslaghoogte weergegeven. Deze berekening is niet alleen voor de vier genoemde overslagdebieten uitgevoerd, maar ook is bij de huidige kruinhoogte het overslagdebiet vastgesteld. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in Tabel 8.3.

Tabel 8.3 Resultaten PC-Overslag

klimaatscenario	q (l/s/m)	h_{mhw} (m+NAP)	γ_b (-)	γ_f (-)	$\gamma_{\beta;ru}$ (-)	$\gamma_{\beta;ovt}$ (-)	$z_{2\%}$ (m)	$h_{mhw}+z_{2\%}$ (m)	$h_{kruin;ovt}$ [1] (m+NAP)
G+	0,1	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,35	13,33
	1,0	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,35	11,63
	10,0	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,35	9,92
	40,0	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,54	11,32	8,88
	302,2	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	6,49	12,27	7,80
W+	0,1	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,60	13,58
	1,0	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,60	11,88
	10,0	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,60	10,17
	40,0	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,54	11,57	9,13
	409,3	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	6,52	12,55	7,80

[1]: $k_{kr;ovt}$ = minimaal benodigde kruinhoogte voor golfoploop/golfoverslag

Uit de resultaten van PC-Overslag blijkt dat (evenals in de vijfjaarlijkse toetsing al naar voren kwam) bij de huidige kruinhoogte er een golfoverslagdebiet van ongeveer 300 l/s/m (klimaatscenario G+) en ongeveer 400 l/s/m (klimaatscenario W+) kan optreden. Deze waarden zijn vrij hoog als men bedenkt dat (de kruin en het binnentalud van) een dijklichaam normaliter op een overslagdebiet van 0,1 of 1 of 10 l/s/m wordt ontworpen. Als hiervoor een dijkbekleding ontworpen dient te worden die hiertegen bestand is, zal deze dusdanige afmetingen (bijvoorbeeld een ordegrootte van een meter in het geval van losgestorte steen) krijgen waarbij andere factoren (zoals geometrie, stabiliteit, kosten, et cetera) een rol gaan spelen.

Opmerking: De hoge overslagdebieten zijn een gevolg van de randvoorwaarden waarop een dijklichaam getoetst wordt. Voor de Afsluitdijk betreft dit de maatgevende omstandigheden die gemiddeld eens in de tienduizend jaar voorkomen. De vraag die gesteld kan worden is of er met deze

maatgevende omstandigheden niet te zware eisen worden gesteld aan een ontwerp. Dit is een discussiepunt waar hier niet op in zal worden gegaan.

Kruinhoogte

De kruinhoogte wordt voor deze integrale oplossing vastgesteld met vergelijking (7.1). De berekening van de kruinhoogte is weergegeven in appendix R. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in Tabel 8.4.

Tabel 8.4 Overzicht bijdragen en minimale kruinhoogte bij vastgesteld klimaatscenario en overslagdebiet

klimaat-scenario	q (l/s/m)	$h_{mhw;2001}$ (m+NAP)	$h_{kr;pr}$ (m+NAP)	h_{hws} (m)	h_t (m)	h_{ovs} (m)	h_{bd} (m)	h_{kd} (m)	$h_{kr;min}$[1] (m+NAP)	Δh (m)
G+	0,1	5,10	7,80	0,58	0,00	7,55	0,10	0,50	13,83	6,03
	1	5,10	7,80	0,58	0,00	5,85	0,10	0,41	12,04	4,24
	10	5,10	7,80	0,58	0,00	4,14	0,10	0,32	10,24	2,44
	40	5,10	7,80	0,58	0,00	3,10	0,10	0,27	9,15	1,35
W+	0,1	5,35	7,80	0,58	0,00	7,55	0,10	0,52	14,10	6,30
	1	5,35	7,80	0,58	0,00	5,85	0,10	0,43	12,30	4,50
	10	5,35	7,80	0,58	0,00	4,14	0,10	0,34	10,51	2,71
	40	5,35	7,80	0,58	0,00	3,10	0,10	0,28	9,41	1,61

[1]: $k_{kr;min}$ = minimaal benodigde kruinhoogte

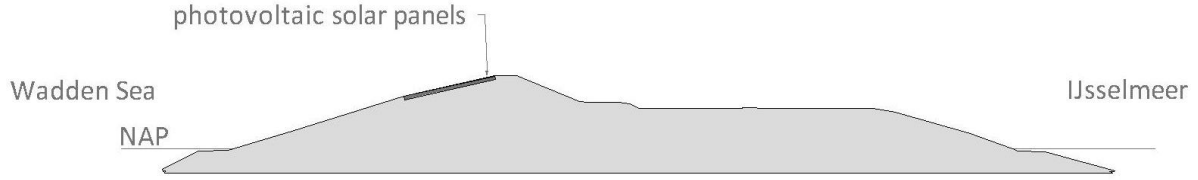
Om, ten opzichte van de huidige situatie het overslagdebiet te reduceren tot de normale ontwerpwaarden dient de kruin behoorlijk te worden verhoogd. Bij een overslagdebiet van:

- 0,1 l/s/m dient de kruin te worden verhoogd tot 13,83 m+NAP voor klimaatscenario G+ en tot 14,10 m+NAP voor klimaatscenario W+. Dit betekent een kruinverhoging (Δh) van 6,03 m respectievelijk 6,30 m;
- 1 l/s/m dient de kruin te worden verhoogd tot 12,04 m+NAP voor klimaatscenario G+ en tot 12,30 m+NAP voor klimaatscenario W+. Dit betekent een kruinverhoging (Δh) van 4,24 m respectievelijk 4,50 m;
- 10 l/s/m dient de kruin te worden verhoogd tot 10,24 m+NAP voor klimaatscenario G+ en tot 10,51 m+NAP voor klimaatscenario W+. Dit betekent een kruinverhoging (Δh) van 2,44 m respectievelijk 2,71 m;
- 40 l/s/m kan er worden volstaan met een geringere kruinhoogte, namelijk 9,15 m+NAP voor klimaatscenario G+ en 9,41 m+NAP voor klimaatscenario W+. Dit betekent een kruinverhoging (Δh) van 1,35 m respectievelijk 1,61 m.

De andere te toetsen punten van Tabel 8.2 en een verdere beschouwing van het integraal ontwerp worden apart per locatie in het dwarsprofiel behandeld.

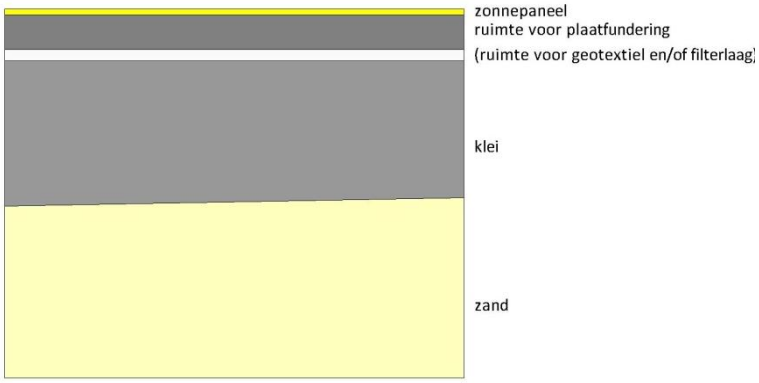
8.4.2 Zonnepanelen op buitentalud (onbelaste zone)

In deze paragraaf wordt voor het integrale ontwerp het plaatsen van zonnepanelen op het buitentalud (onbelaste zone) van de Afsluitdijk beschouwd (zie Figuur 8.8).



Figuur 8.8 Zonnepanelen op buitentalud (onbelaste zone)

Bij het plaatsen van zonnepanelen op het buitentalud wordt op het bovenste deel van het buitentalud in de onbelaste zone een plaatbekleding van beton aangebracht. In het geval van een kruinverhoging kan dit direct in het ontwerp worden meegenomen. In het geval van een gelijkblijvende kruinhoogte of een geringe kruinverhoging kan dit een verbetering van de huidige bekleding betekenen.
De zonnepanelen en plaatfundering zullen in het integraal ontwerp gezamenlijk de functie van bekledingsconstructie innemen. Indien noodzakelijk kan tussen het zonnepaneel en de plaatfundering nog een bevestigingsmiddel (bijvoorbeeld profielen of voeten) worden geplaatst. Hiermee kan ook extra ruimte tussen de plaatbekleding en de zonnepanelen worden gecreëerd om (frequent) contact met eventuele golfoploop te vermijden. De opbouw bestaat uit de onderlaag (klei) met daarop eventueel een geotextiel en granulaire laag. Hier bovenop komt de plaatbekleding met zonnepanelen. De laagopbouw bij deze oplossing is weergegeven in Figuur 8.9.



Figuur 8.9 Laagopbouw buitentalud

Allereerst wordt bekeken welke hoogte de onbelaste zone op het buitentalud heeft. De hoogte van de onbelaste zone kan worden berekend door de kruinhoogte met de hoogte van de ondergrens van de onbelaste zone te verminderen (zie Figuur 8.3):

$$h_{oz} = h_{kr} - \left(toetspeil + toeslagen + \frac{1}{2} z_{2\%} \right) \qquad \text{(Waterstaat, 2007)} \qquad (8.1)$$

waarin:

h_{oz} = hoogte onbelaste zone [m]

De hoogte van de onbelaste zone is voor verschillende overslagdebieten weergegeven in Tabel 8.5.

Tabel 8.5 Bepalen hoogte onbelaste zone

klimaat-scenario	q (l/s/m)	h_{kr} (m+NAP)	$z_{2\%}$ (m)	$h_{mhw;2001}$ (m+NAP)	h_{oz} (m)
G+	0,1	13,83	5,57	5,78	5,27
	1	12,04	5,57	5,78	3,47
	10	10,24	5,57	5,78	1,68
	40	9,15	5,54	5,78	0,59
W+	0,1	14,10	5,57	6,03	5,28
	1	12,30	5,57	6,03	3,49
	10	10,51	5,57	6,03	1,69
	40	9,41	5,54	6,03	0,61

Verder wordt bekeken of er getoetst dient te worden op de volgende punten (zie appendix F voor nadere toelichting van onderstaande faalmechanismen):

1. Toplaaginstabiliteit onder golfaanval
   Aangezien zonnepanelen alleen in de onbelaste zone van het buitentalud worden geplaatst, behoefd de plaatbekleding niet te worden getoetst op golfaanval.
2. Toplaaginstabiliteit onder langsstroming
   Aangezien zonnepanelen alleen in de onbelaste zone van het buitentalud worden geplaatst, behoefd de plaatbekleding niet te worden getoetst op langsstroming.
3. Afschuiving
   De belasting ten gevolge van de constructie zal ten opzichte van de huidige situatie niet veel veranderen (ongeveer hetzelfde eigen gewicht), waardoor er geen problemen zullen worden verwacht ten aanzien van de afschuiving van de dijkbekleding.
4. Materiaaltransport vanuit de ondergrond;
5. Materiaaltransport vanuit de granulaire laag.
6. Erosie van de onderlagen.

Plaatfundering

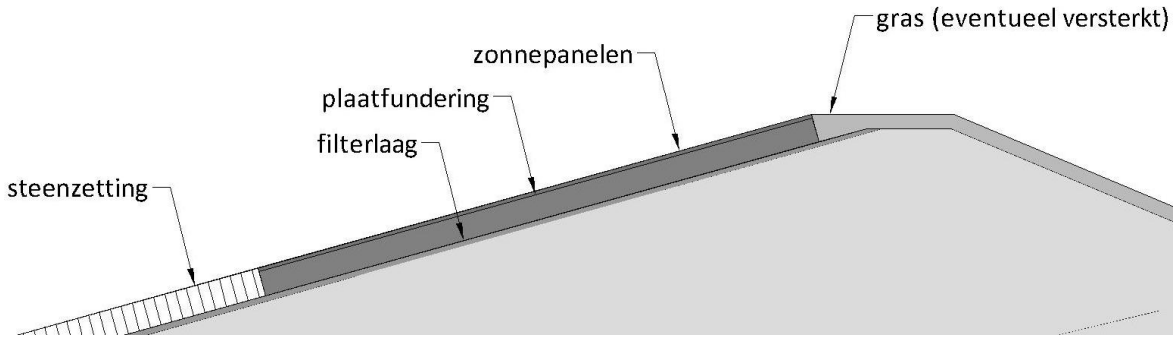
De plaatfundering bestaat uit een geprefabriceerde plaat van beton. Ter besparing van materiaal en om hoge(re) stroomsnelheden over de bekleding te voorkomen, zullen sparingen in de plaat aanwezig zijn. De plaat kan dus eigenlijk worden beschouwd als een raamwerk van beton met daarop zonnepanelen. Voor het integraal ontwerp wordt in het dwarsprofiel een hoogte van 0,30 m vrijgehouden voor de plaatbekleding.

Geotextiel en filterlaag

De ondergrond bestaat uit klei waarop een geotextiel wordt aangebracht. Ter bescherming van dit geotextiel, om de geprefabriceerde plaatbekleding goed te kunnen stellen en om voldoende weerstand te bieden tegen hoge stroomsnelheden van afstromend water over het talud wordt op de geotextiel een laag stortsteen aangebracht. De laagdikte hiervan zal ongeveer 5 cm bedragen.

Aansluiting op de huidige bekleding en de kruin

De aansluiting op de huidige bekleding kan worden gerealiseerd door ervoor te zorgen dat de bovenzijde van de huidige bekleding (bovenzijde talud) een rechte lijn vormt waartegen de plaatbekleding kan worden geplaatst. De kruin van de dijk zal worden aangevuld tot aan de bovenzijde van de plaatbekleding. Afhankelijk van het overslagdebiet kunnen hierbij bijvoorbeeld doorgroeistenen worden gebruikt. De geotextiel dat onder de plaatbekleding ligt zal deels onder de huidige bekleding (lager op het talud en onder de kruin) moeten worden aangebracht (zie Figuur 8.10).



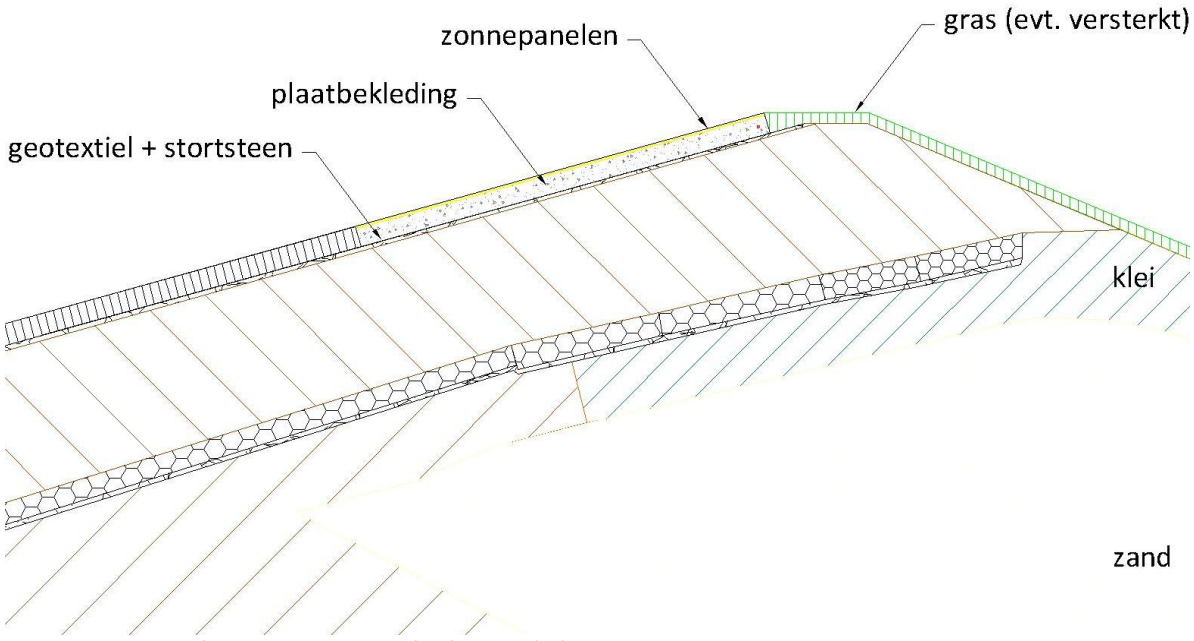
Figuur 8.10 Plaatbekleding buitentalud

Overige toetspunten

De overige toetspunten (piping en heave, macrostabiliteit binnenwaarts, macrostabiliteit buitenwaarts, microstabiliteit en stabiliteit van het voorland) worden door het toepassen van zonnepanelen op het buitentalud (onbelaste zone) niet beïnvloedt en hoeven daarom niet te worden getoetst.

Zonnepanelen op het buitentalud (integraal ontwerp)

Nu de toetspunten behandeld zijn kan het integrale ontwerp met zonnepanelen op het buitentalud weergegeven worden (zie Figuur 8.12).



Figuur 8.11 Integraal ontwerp zonnepanelen buitentalud

Kenmerken van het integrale ontwerp zijn:

- filterlaag bestaande uit een geotextiel en een granulair filter;
- plaatfundering in de vorm van een raamwerk;
- zonnepanelen.

Uitvoering

Er worden hieronder nog enkele praktische opmerkingen gemaakt met betrekking tot de uitvoering:

- Het geheel van geprefabriceerde plaatbekleding met voorgemonteerde zonnepanelen kan vanaf de kruin worden aangebracht;
- De geprefabriceerde plaatbekleding heeft een breedte van 2 m. Dit zorgt ervoor dat het aantal platen dat geplaatst dient te worden gering is (ten opzichte van bijvoorbeeld platen met een breedte van 1 m) en de platen toch goed transporteerbaar zijn;
- Om de elementen van de plaatfundering te kunnen plaatsen op het buitentalud dienen bij het maken van deze elementen hijsogen aangebracht te worden.

Kosten

Tot slot zijn voor dit integrale ontwerp ook kosten berekend. Dit zijn extra kosten die bij de verbeteringsmaatregel opgeteld dienen te worden. Aangezien de kosten een schatting betreffen en de verschillen in dimensionering tussen de klimaatscenario's gering zijn, wordt voor het berekenen de kosten geen onderscheid gemaakt in de verschillende klimaatscenario's. In de berekening van de kosten zijn de materiaalkosten, materieelkosten en manuren meegenomen. In Tabel 8.6 zijn de kosten voor het integrale ontwerp met zonnepanelen op het buitentalud weergegeven.

Tabel 8.6 Kosten integrale oplossing zonnepanelen buitentalud

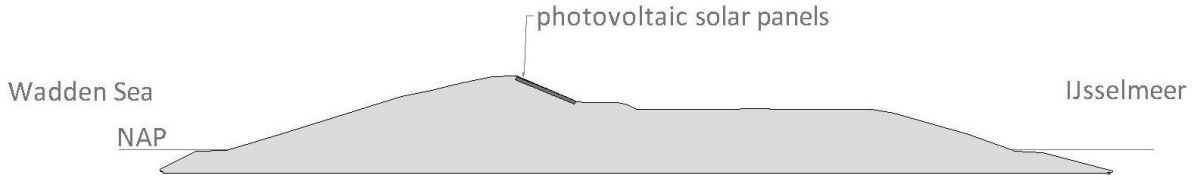
kostenaspect	kosten/eenheid (€/eenheid)	aantal eenheden	eenheid	kosten (€)
fundering				
verwijderen huidige dijkbekleding	5,00	7,0	m^2	35,00
aanbrengen geotextiel	7,50	7,0	m^2	52,50
filterlaag (losgestorte steen)	40,00	2,65	ton	106,00
plaatsen prefab elem.	500,00	1,0	st	500,00
opbouw				
verbinding fundering-zonnepanelen	20,00	1,0	elem.	20,00
zonnepanelen	500,00	6,0	m^2	3.000,00
totaal per meter dijk				**3.713,50**
lengte Afsluitdijk (m)				31.400
totaal Afsluitdijk				**116.603.900,00**

Voor- en nadelen

+ Zonnepanelen functioneren als duurzame energieomzetter en zijn onderdeel van de dijkbekleding;
− Hogere kosten ten opzichte van een normale dijkbekleding door de aanwezigheid van zonnepanelen.

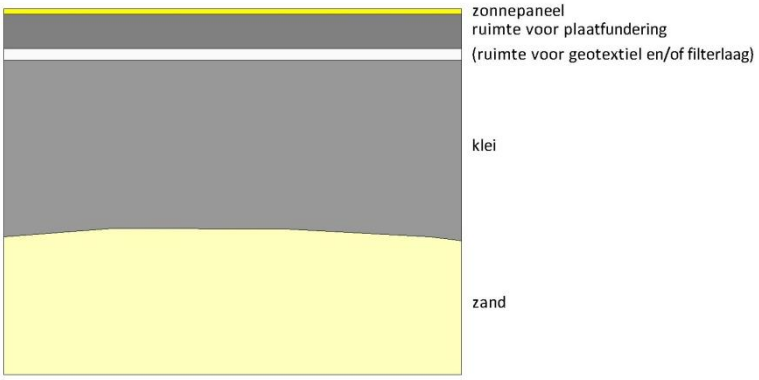
8.4.3 Zonnepanelen op binnentalud

In deze paragraaf wordt voor het integrale ontwerp het plaatsen van zonnepanelen op het binnentalud van de Afsluitdijk beschouwd (zie Figuur 8.12).



Figuur 8.12 Zonnepanelen op binnentalud

Aangezien de huidige bekleding van het binnentalud (gras) slecht tot niet kan leven onder zonnepanelen en deze niet aan de veiligheidsnormen voldoet, dient bij de plaatsing van zonnepanelen op het binnentalud te worden gekozen voor een plaatfundering. De bekleding van het binnentalud dient bescherming te bieden tegen erosie door en infiltratie van overslaand water. In de huidige situatie functioneert de grasbekleding in combinatie met de kleilaag als erosiebestendige dijkbekleding. Infiltratie treedt nauwelijks op door de aanwezige kleilaag.
Het integraal ontwerp zal bestaan uit zonnepanelen en een plaatfundering (op een filterlaag) die gezamenlijk de functie van bekledingsconstructie innemen. Indien noodzakelijk kan tussen het zonnepaneel en de plaatfundering nog een bevestigingsmiddel (bijvoorbeeld profielen of voeten) worden geplaatst. De laagopbouw bij deze oplossing is weergegeven in Figuur 8.13.



Figuur 8.13 Laagopbouw binnentalud

Nu de opbouw bekend is kan er worden gekeken naar de exacte invulling van deze lagen, welke afhankelijk is van de hoeveelheid golfoverslag. Als het golfoverslagdebiet 0,1 of 1 l/s/m bedraagt kan worden volstaan met de minimale eisen voor de bekleding. Als het golfoverslagdebiet 10 of 40 l/s/m bedraagt worden zwaardere eisen gesteld aan de bekleding.

Plaatfundering

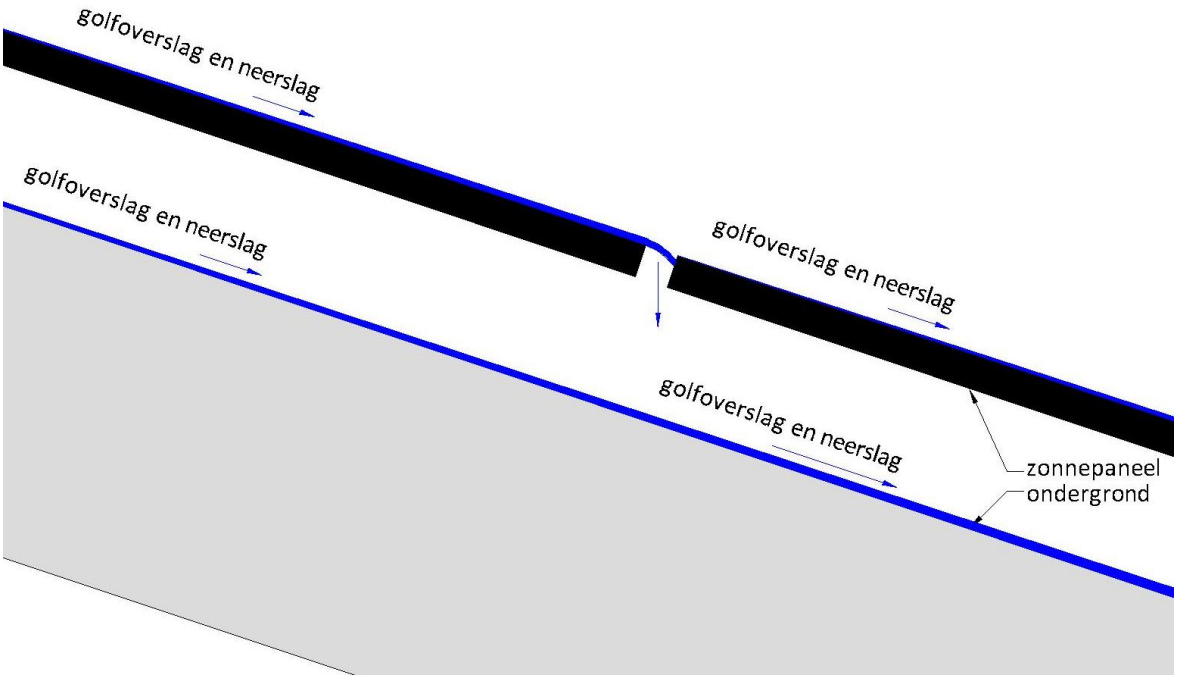
De plaatfundering bestaat uit een geprefabriceerde plaat van beton. Ter besparing van materiaal en om hoge(re) stroomsnelheden over de bekleding te voorkomen, zullen sparingen in de plaat aanwezig zijn. De plaat kan dus eigenlijk worden beschouwd als een raamwerk van beton met daarop zonnepanelen. Voor het integraal ontwerp wordt in het dwarsprofiel een hoogte van 0,30 m vrijgehouden voor de plaatbekleding.

Geotextiel en filterlaag

De ondergrond bestaat uit klei waarop een geotextiel wordt aangebracht. Ter bescherming van dit geotextiel, om de geprefabriceerde plaatbekleding goed te kunnen stellen en om voldoende weerstand te bieden tegen hoge stroomsnelheden van afstromend water over het talud wordt op de geotextiel een laag stortsteen aangebracht. De laagdikte hiervan zal ongeveer 5 cm bedragen.

Laagdikte en stroomsnelheid van overslag

In de nieuwe situatie dienen zonnepanelen en ondergrond de functie van de grasbekleding over te nemen. De bovenste laag van een zonnepaneel bestaat uit glas en is dus erosiebestendig. Het water (neerslag, golfoverslag) dat op een zonnepaneel terechtkomt, zal door de helling van een zonnepaneel naar beneden stromen en bij de rand van een zonnepaneel afstromen. De ruimte tussen de zonnepanelen bepaalt hoeveel water er op de ondergrond terechtkomt en hoeveel er verder stroomt over de andere panelen.
Worden de zonnepanelen strak tegen elkaar gemonteerd, dan zal er alleen lekwater op de ondergrond terechtkomen en zal het grootste deel van de golfoverslag en neerslag over de zonnepanelen naar beneden stromen.
Worden er ruimten tussen de zonnepanelen gehouden, dan zal er niet alleen lekwater op de ondergrond terechtkomen maar ook zal er golfoverslag en neerslag afkomstig van de zonnepanelen. Het aandeel van de golfoverslag en neerslag dat verder over de zonnepanelen naar beneden stroomt, zal hierbij kleiner zijn. Verder kan er bij ruimten tussen de zonnepanelen een kracht ten gevolge van een straal water op de rand van een zonnepaneel komen te staan. Dit wordt nader besproken bij ‘Belastingen’.
De ondergrond onder een zonnepaneel vangt het water van de zonnepanelen op en voert dit samen met het overige water (golfoverslag en neerslag) af. Deze laatste stap is vergelijkbaar met de afvoer van water in de huidige situatie. In Figuur 8.14 is schematisch weergegeven hoe het water over een zonnepaneel zal gaan stromen.



Figuur 8.14 Detail van stroming over en tussen zonnepanelen

Om te voorkomen dat de ondergrond onder de zonnepanelen erodeert ten gevolge van stromend water (ook bij toepassing van een element- of plaatfundering), dient op de ondergrond een bescherming te worden aangebracht. Dit kan middels een geotextiel al dan niet gecombineerd met een filterlaag. Om de afmetingen van deze filterlaag te kunnen bepalen zijn de laagdikte en stroomsnelheid van de golfoverslag en neerslag van belang. Er wordt aangenomen dat de stroming ten gevolge van overslaand water hierbij als maatgevend kan worden beschouwd voor de bepaling van de erosiebestendigheid van de ondergrond.
De berekeningen voor de maximum laagdikte en maximum stroomsnelheid van overslaand water op het binnentalud zijn gebaseerd op de theorieën van Schüttrumpf (vergelijking (7.11) en vergelijking (7.12)), Van Gent (vergelijking (7.19) en vergelijking (7.20)) en Bosman (vergelijking (7.19) en vergelijking (7.20)) en zijn weergegeven in appendix U. Verder zijn in appendix U grafieken waarin de laagdikte en stroomsnelheid zijn uitgezet tegen de afstand op het binnentalud weergegeven. In Tabel 8.7 is een overzicht van de resultaten, bij een afstand op het binnentalud van s = 3,00 m, weergegeven.

Tabel 8.7 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag op het binnentalud (s = 3,00 m)

climate	Schüttrumpf		Van Gent		Bosman	
model	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)
G+ (q=10)	0,17	5,62	0,05	5,23	0,00	0,98
G+ (q=40)	0,32	7,18	0,16	7,59	0,01	2,93
W+ (q=10)	0,17	5,60	0,05	5,19	0,00	0,95
W+ (q=40)	0,32	7,16	0,16	7,57	0,01	2,92

De resultaten lopen nogal uiteen, waarbij te zien is dat de resultaten volgens de theorie van Schüttrumpf en Van Gent het meest overeenkomen. De afwijkende resultaten van Bosman zijn een gevolg van de berekeningen voor de landzijde van de kruin. De resultaten hiervan worden gebruikt voor het berekenen van de laagdikte en stroomsnelheid ter plaatse van het binnentalud (h_0 en u_0 in vergelijking (7.19)). Als de theorie van Bosman voor het binnentalud wordt gebruikt met de resultaten voor de landzijde van de kruin volgens de theorie van Schüttrumpf en Van Gent worden reëlere resultaten zichtbaar. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.8.

Tabel 8.8 Laagdikte en stroomsnelheden op binnentalud volgens Bosman (s = 3,00 m)

climate model	Schüttrumpf		Van Gent	
	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)
G+ (q=10)	0,16	5,93	0,05	5,23
G+ (q=40)	0,31	7,42	0,16	7,59
W+ (q=10)	0,16	5,91	0,05	5,19
W+ (q=40)	0,31	7,40	0,16	7,57

Voor het dimensioneren van de fundering en bovenbouw voor dit integrale ontwerp worden de resultaten op basis van de waarden van Schüttrumpf en Van Gent (Tabel 8.8) gemiddeld, met als resultaat de rekenwaarden zoals weergegeven in Tabel 8.9.

Tabel 8.9 Rekenwaarden laagdikte en stroomsnelheid

climate model	$h_{2\%}(x_c=0)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=0)$ (m/s)
G+ (q=10)	0,11	5,58
G+ (q=40)	0,24	7,50
W+ (q=10)	0,10	5,55
W+ (q=40)	0,23	7,49

Stabiliteit van de bekleding

Nu de laagdikte en stroomsnelheid op het binnentalud bekend zijn kunnen hiermee de afmetingen voor filterlaag (losgestorte steen) worden vastgesteld. De afmetingen kunnen worden berekend aan de hand van vergelijking (7.34). De berekening van de afmetingen van de losgestorte steen is weergegeven in appendix V. Een samenvatting van de berekening is weergegeven in Tabel 8.10.

Tabel 8.10 Berekening nominale diameter losgestorte steen

climate model	q (l/s/m)	C ($m^{1/2}/s$)	d_{n50} (m)	ϕ (°)	α (°)	K_s (-)	d_{n50} (m)	ρ_a (kg/m^3)	W_{50} (kg)
G+	10	-29,146	0,740	31,7	18,4	0,44	1,70	2650	12.725
	40	-21,872	2,378	31,7	18,4	0,44	5,46	2650	422.340
W+	10	-29,294	0,725	31,7	18,4	0,44	1,66	2650	11.970
	40	-21,920	2,356	31,7	18,4	0,44	5,40	2650	410.402

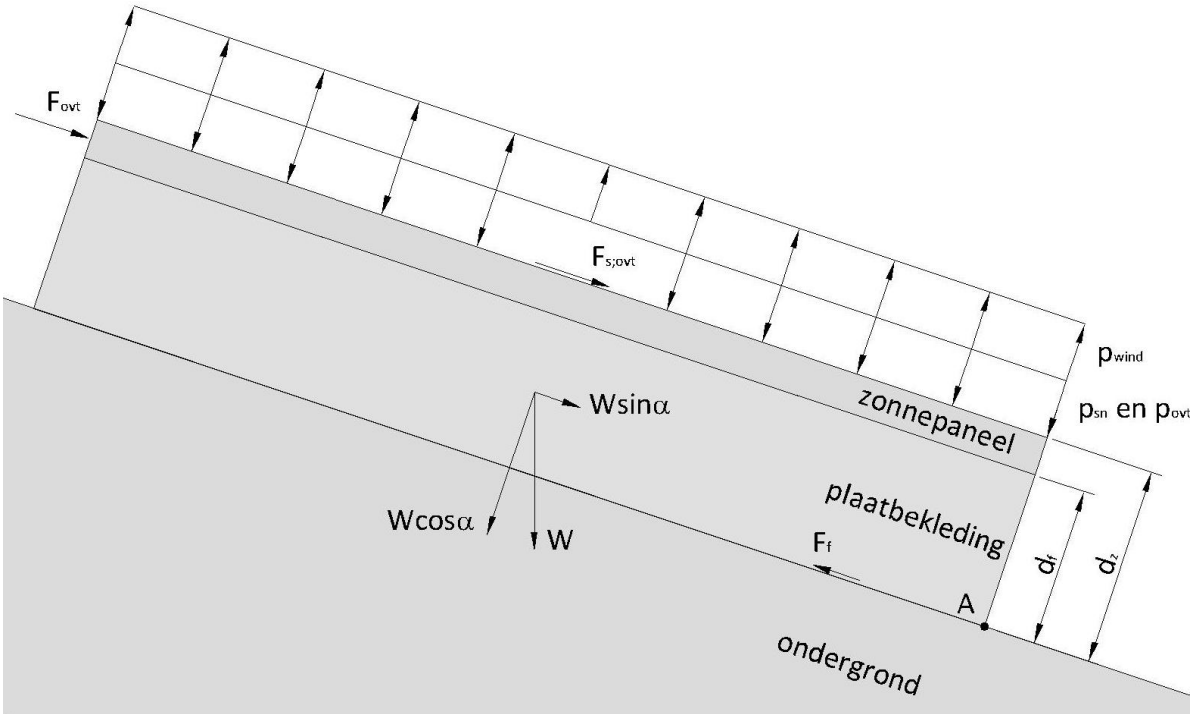
De hoge, niet-reële waarden voor de nominale steendiameter en gewicht zijn een gevolg van de kleine waterdiepte en hoge stroomsnelheid over het binnentalud. Bij iteratie vertoont de Chezy coëfficiënt zelfs een negatieve waarde! Een andere methode is noodzakelijk om de benodigde gegevens vast te stellen.

Belastingen

Er zijn verschillende belastingen die op de constructie met de zonnepanelen komen te staan. Bij het ontwerp van deze integrale oplossing is onderscheid gemaakt in de volgende belastingen:

- eigen gewicht
- weerstand door opsluitbalk en bodemwrijving
- neerslag
- overslag
- stroming
- wind

Deze belastingen zijn weergegeven in Figuur 8.15 en zullen daarna worden besproken.



Figuur 8.15 Krachten op fundering en zonnepaneel

waarin:

F_{ovt}	=	kracht door golfoverslag en neerslag	[N]
$F_{s;ovt}$	=	schuifkracht door golfoverslag en neerslag	[N]
W	=	eigen gewicht fundering en zonnepaneel	[N]
α	=	hoek van het talud	[°]
F_f	=	schuifweerstand door ondergrond	[N]
p_{ovt}	=	gelijkmatig verdeelde belasting ten gevolge van golfoverslag	[N/m^2]
p_{sn}	=	gelijkmatig verdeelde belasting ten gevolge van neerslag	[N/m^2]
p_{wind}	=	gelijkmatig verdeelde belasting ten gevolge van wind	[N/m^2]
d_f	=	hoogte fundering	[m]
d_z	=	hoogte fundering en zonnepaneel	[m]

Eigen gewicht (W)

Het eigen gewicht van de gehele constructie is weergegeven in Tabel 8.11.

Tabel 8.11 Eigen gewicht constructie

belasting	ρ (kg/m^3)	P_{rep} (kg/m^2)	P_{rep} (kN/m^2)
eigen gewicht zonnepanelen	2.500	50	0,49
eigen gewicht losgestorte steen	2.000	100	0,98
eigen gewicht plaatbekleding	2.400	330	3,24
totaal		**480**	**4,71**

De belasting ten gevolge van het eigen gewicht is: 4,71 kN/m^2 (gemiddeld)

Weerstand door opsluitbalk en bodemwrijving (F_f)
Door het plaatsen van een opsluitbalk bij de binnenberm zal voorkomen moeten worden dat de gehele constructie naar beneden (richting binnenberm) glijdt. De wrijving van de bodem zal hier ook een bijdrage aan leveren.

Neerslag (p_{sn})
De belasting ten gevolge van de neerslag (sneeuw) is vastgesteld in appendix P en bedraagt: 0,56 kN/m^2.

Belasting ten gevolge van overslag (p_{ovt})
Met de theorie van Bosman kan ook het maximale overslagvolume worden berekend. Het overslagvolume kan worden berekend met vergelijking (7.29) en vergelijking (7.30), waarvan de resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.12.

Tabel 8.12 Overslagvolume

climate model	$h_{2\%}(x_c=0)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=0)$ (m/s)	$T_{ovt,2\%}(x_c=0)$ (s)	$V_{2\%}$[1] (l/m)	p[1] (kN/m^2)	$V_{2\%}$[2] (l/m)	p[2] (kN/m^2)
G+ (q=10)	0,04	3,58	4,56	20,69	0,04	1,23	0,00
G+ (q=40)	0,08	5,06	6,43	82,09	0,17	4,87	0,01
W+ (q=10)	0,04	3,56	4,53	20,21	0,04	1,20	0,00
W+ (q=40)	0,08	5,04	6,42	81,13	0,16	4,81	0,01

[1]: berekend op basis van vergelijking (7.29)
[2]: bereken op basis van vergelijking (7.30)

Voor het bepalen van het maximale overslagvolume is de grootste waarde van vergelijking (7.29) en vergelijking (7.30) gebruikt. Het blijkt dat bij een overslagdebiet van 10 l/s/m het maximale overslagvolume 20,69 l/m bedraagt. Als wordt aangenomen dat dit volume op een oppervlakte van 5 m^2 (1 m dijklengte, bij een helling van het binnentalud met een lengte van 5 m) van het binnentalud terechtkomt, levert dit een laagdikte van ongeveer 0,5 cm zoutwater op. Vervolgens kan de gelijkmatig verdeelde belasting op een zonnepaneel ten gevolge van overslag worden berekend:

$$p = \rho_w g V_{2\%} \tag{8.2}$$

waarin:

p	=	gelijkmatig verdeelde oppervlaktebelasting	[N/m^2]
ρ_w	=	soortelijke massa water	[kg/m^3]
g	=	zwaartekrachtsversnelling	[m/s^2]
$V_{2\%}$	=	overslagvolume overschreden door 2% van de inkomende golven	[m^3]

Ingevuld geeft dit: $p = 1.025 \times 9,81 \times \frac{20,7 \cdot 10^{-3}}{5} = 0,04$ kN/m^2

In het geval van een overslagdijk (ontworpen voor q = 40 l/s/m) blijkt het maximale overslagvolume 82,09 l/m te bedragen. Analoog aan het voorgaande levert dit een laagdikte van ongeveer 1,6 cm zoutwater en een gelijkmatig verdeelde oppervlaktebelasting van 0,17 kN/m^2 op.

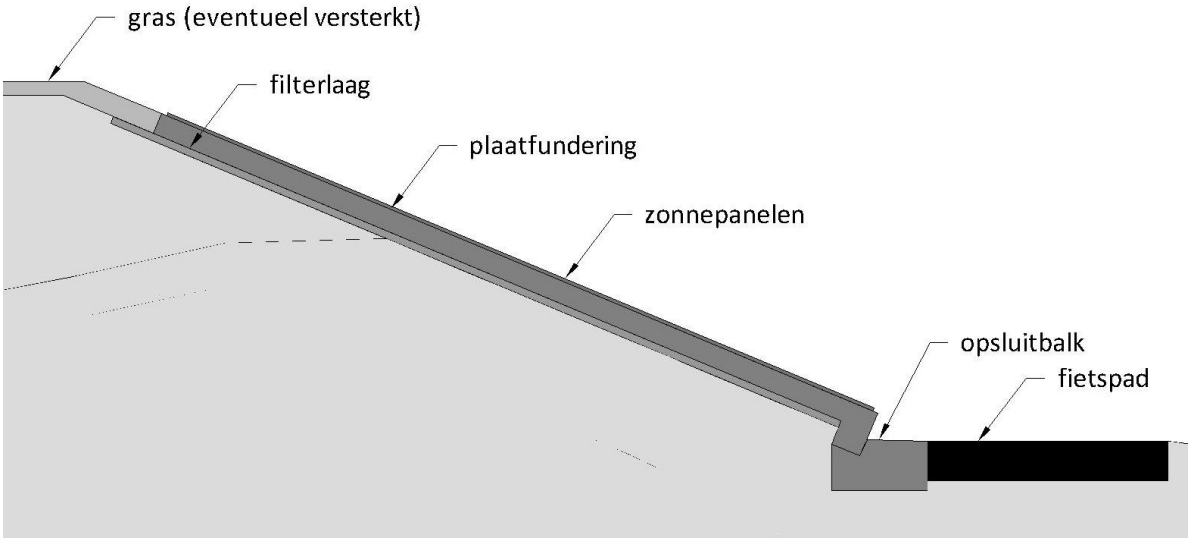
Voor de maximum belasting ten gevolge van overslaand water bij een overslagdebiet van 10 l/s/m dient p = 0,04 kN/m^2 aangehouden te worden. Voor de maximum belasting ten gevolge van overslaand water bij een overslagdebiet van 40 l/s/m dient p = 0,17 kN/m^2 aangehouden te worden.

Schuifbelasting ten gevolge van overslag en neerslag ($F_{s;ovt}$)
Golfoverslag en neerslag die over de zonnepanelen naar beneden stromen leveren een kracht parallel aan de zonnepanelen. De belasting ten gevolge van deze kracht mag worden verwaarloosd vanwege de geringe invloed door het gladde oppervlak van de zonnepanelen.

Kracht ten gevolge van overslag (F_{ovt})
De maximum belasting op de zijkant van een zonnepaneel ten gevolge van overslaand water kan op dezelfde manier worden berekend als de belasting (boven)op een zonnepaneel ten gevolge van overslag. De zijkant van een zonnepaneel heeft een oppervlakte van 0,02 m^2 waarop het overslaande water een kracht op uitoefent. Gezien de geringe dikte van de zonnepanelen is er maar een klein vlak waar het water invloed op uit kan oefenen. Afgezien van piekbelastingen kan deze kracht maximaal 0,2 kN bedragen. Aangezien dit een dwarskracht betreft wordt de invloed hiervan verwaarloosd.

Wind (p_{wind})
De belasting ten gevolge van wind is vastgesteld in appendix P en bedraagt: 0,00 kN/m^2 voor druk en -0,45 kN/m^2 voor zuiging (trekkracht).

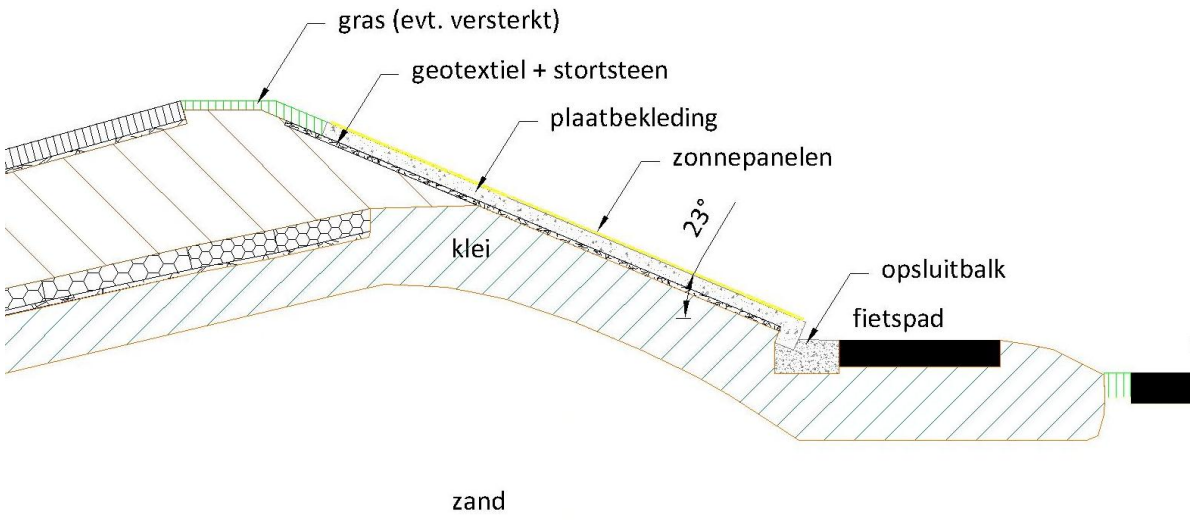
Aansluiting op de kruin en de binnenberm
De aansluiting op de bekleding bij de binnenberm (fietspad) vindt plaats middels de opsluitbalk die tegen het fietspad wordt geplaatst. De kruin van de dijk zal worden aangevuld tot aan de bovenzijde van de plaatbekleding. Afhankelijk van het overslagdebiet kunnen hierbij bijvoorbeeld doorgroeistenen worden gebruikt. De geotextiel dat onder de plaatbekleding ligt zal deels onder de opsluitbalk en de aanvulling bij de kruin moeten worden aangebracht (zie Figuur 8.16).



Figuur 8.16 Plaatbekleding binnentalud

Overige toetspunten
De overige toetspunten (piping en heave, macrostabiliteit binnenwaarts, macrostabiliteit buitenwaarts, microstabiliteit en stabiliteit van het voorland) worden door het toepassen van zonnepanelen op het buitentalud (onbelaste zone) niet beïnvloedt en hoeven daarom niet te worden getoetst.

Zonnepanelen op het binnentalud (integraal ontwerp)
Nu de toetspunten behandeld zijn kan het integrale ontwerp met zonnepanelen op het binnentalud weergegeven worden (zie Figuur 8.17).



Figuur 8.17 Integraal ontwerp zonnepanelen binnentalud

Zie voor detailtekeningen van het integraal ontwerp met zonnepanelen op het binnentalud appendix W.

Kenmerken van het integrale ontwerp zijn:
- filterlaag bestaande uit een geotextiel en een granulair filter;
- plaatfundering in de vorm van een raamwerk;
- zonnepanelen;

Uitvoering

Er worden hieronder nog enkele praktische opmerkingen gemaakt met betrekking tot de uitvoering:
- Het geheel van geprefabriceerde plaatbekleding met voorgemonteerde zonnepanelen kan vanaf het fietspad en de kruin worden aangebracht;
- De geprefabriceerde plaatbekleding heeft een breedte van 2 m. Dit zorgt ervoor dat het aantal platen dat geplaatst dient te worden gering is (ten opzichte van bijvoorbeeld platen met een breedte van 1 m) en de platen toch goed transporteerbaar zijn;
- Om de elementen van de plaatfundering te kunnen plaatsen op het binnentalud dienen bij het maken van deze elementen hijsogen aangebracht te worden.

Kosten

Tot slot zijn voor dit integrale ontwerp ook kosten berekend. Dit zijn extra kosten die bij de verbeteringsmaatregel opgeteld dienen te worden. Aangezien de kosten een schatting betreffen en de verschillen in dimensionering tussen de klimaatscenario's gering zijn, wordt voor het berekenen de kosten geen onderscheid gemaakt in de verschillende klimaatscenario's. In de berekening van de kosten zijn de materiaalkosten, materieelkosten en manuren meegenomen. In Tabel 8.13 zijn de kosten voor het integrale ontwerp met zonnepanelen op het binnentalud weergegeven.

Tabel 8.13 Kosten integrale oplossing zonnepanelen binnentalud

kostenaspect	kosten/eenheid (€/eenheid)	aantal eenheden	eenheid	kosten (€)
fundering				
ontgraven klei binnentalud	5,00	1,0	m^3	5,00
aanbrengen geotextiel	7,50	7,0	m^2	52,50
aanbrengen filterlaag	40,00	2,65	ton	106,00
maken fundering voor prefab elem.	250,00	1,0	m	250,00
plaatsen prefab elem.	500,00	1,0	st	500,00
opbouw				
verbinding fundering-zonnepanelen	20,00	1,0	elem.	20,00
zonnepanelen	500,00	6,0	m^2	3.000,00
totaal per meter dijk				**3.933,50**
lengte Afsluitdijk (m)				31.400
totaal Afsluitdijk				**123.511.900,00**

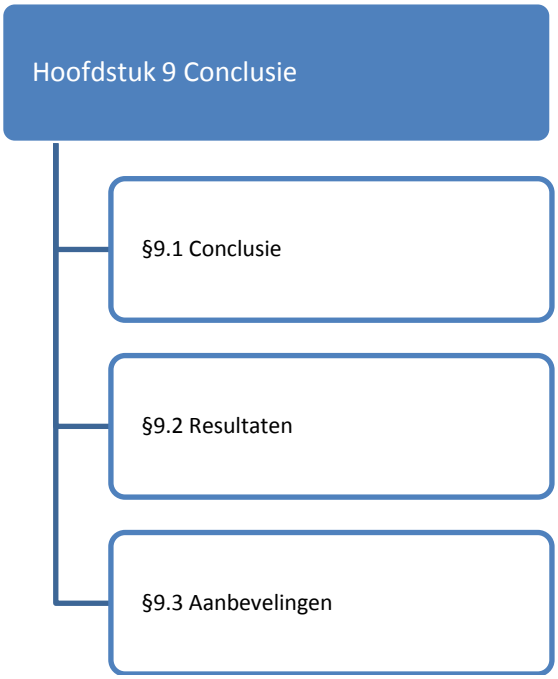
Voor- en nadelen

+ Betere bescherming binnentalud ten opzichte van huidige situatie;
+ Zonnepanelen functioneren als duurzame energieomzetter en zijn onderdeel van de dijkbekleding;
− Hogere kosten ten opzichte van een normale dijkbekleding door de aanwezigheid van zonnepanelen.

8.5 Conclusie

In hoofdstuk 3 zijn de verbeteringsmaatregelen voor een dijklichaam behandeld. Theoretisch is het mogelijk om, ongeacht van de verbeteringsmaatregelen, te allen tijde zonnepanelen op de Afsluitdijk te plaatsen.
De meest geschikte locaties voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam zijn de onbelaste zone van het bovenbeloop (buitentalud), de kruin, het hoge binnentalud, de binnenberm (afhankelijk van het gebruik van de binnenberm), het lage binnentalud (afhankelijk van de inrichting van het achterland) en het achterland (afhankelijk van de inrichting hiervan).
Mogelijke funderingen voor het plaatsen van zonnepanelen betreft een plaatfundering (dijkbekleding) van beton, aangezien. Asfaltbekledingen en gezette steenbekledingen behoren ook tot de mogelijkheden, alleen zal bij dit type bekledingen aangetoond dienen te worden dat de zetting minimaal is aangezien er anders mogelijk ongewenste belastingen in de zonnepanelen kunnen ontstaan.
Een waterkerende functie voor zonnepanelen behoort niet tot de mogelijkheden. Wel kunnen zonnepanelen functioneren als dijkbekleding, echter zal hierbij altijd een hulpconstructie in de vorm van een dijkbekleding noodzakelijk zijn.

9 Conclusie



Figuur 9.1 Indeling hoofdstuk 9

9.1 Conclusie

Dit onderzoek is begonnen met de vraag naar de mogelijkheden voor het plaatsen van zonnepanelen op de Afsluitdijk. Het antwoord hierop is dat het mogelijk is zonnepanelen toe te passen op de Afsluitdijk.

De resultaten die zijn behaald bij de doelstellingen zijn:

1. Zonnepanelen zijn niet bruikbaar als constructief element voor het keren van water, wel in combinatie met constructieve elementen;
2. Zonnepanelen zijn te gebruiken als dijkbekleding, echter dient bijvoorbeeld een filterlaag van stortsteen te worden toegepast tegen faalmechanismen zoals erosie;
3. Voorkeurslocaties (algemeen): binnentalud, binnenberm (indien aanwezig), bovenste deel buitentalud (onbelaste zone);
4. Voorkeurslocatie (Afsluitdijk): hoge binnentalud en de onbelaste zone van het buitentalud.

9.2 Resultaten

In dit onderzoek is voornamelijk de waterbouwkundige kant voor het plaatsen van zonnepanelen op een dijklichaam aan de orde gekomen. Aan andere aspecten, zoals het bepalen van de vereiste afmetingen van betonnen balken, de benodigde hoeveelheid wapening, et cetera, dient nog aandacht geschonken te worden. Wel zijn hiervoor in dit onderzoek randvoorwaarden vastgesteld. Deze zullen hieronder worden opgesomd.

9.3 Aanbevelingen

Tot slot worden de mogelijkheden voor verder onderzoek op dit gebied nog weergegeven. Deze zijn hieronder opgesomd:

- In dit onderzoek is aangenomen dat het niet mogelijk is zonnepanelen in de golfklap- en oploopzone te plaatsen. Met verder onderzoek kan de bestendigheid van zonnepanelen tegen golven en golfoploop worden vastgesteld;
- In dit onderzoek is maar tot een beperkte hoogte rekening gehouden met de duurzaamheid van bijvoorbeeld de gebruikte materialen in het integrale ontwerp. Met verder onderzoek kan worden bekeken of er duurzamere materialen in het integrale ontwerp zijn toe te passen;
- In dit onderzoek is de mogelijkheid voor het plaatsen van een waterkering voor een huidige waterkering genoemd. Het onderzoeken van de probabilistiek rond het gebruik van twee dijken achter elkaar in plaats van een dijk ophogen is een interessante kwestie;
- Met verder onderzoek kunnen ook de mogelijkheden voor export van het principe van een dijk die ook (duurzame) elektriciteit opwekt worden vastgesteld.

Referenties

(WCED), World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future.* 1987.

Akkerman, G.J. 1998. *Stabiliteit van open bekledingen bij hoge stroomsnelheden.* sl : Waterloopkundig Laboratorium Delft, 1998.

Altran Technologies Netherlands BV, Altran Technologies Netherlands BV. 2004. *Potentieel voor energieopwekking uit getijden in de Westerschelde.* 2004.

Balendonck, J. en Sonneveld, P.J. 2007. *Ewicon (Elektrostatische Windenergie Convertor).* 2007.

Bosman, G. 2007. *Velocity and flow depth variations during wave overtopping.* 2007.

Bosselaar, Lex en Gerlagh, Timo. 2006. *Protocol Monitoring Duurzame Energie Update 2006.* 2006.

Briedé, K.J. en Blok, R. 1995. *Tabellen voor bouw- en waterbouwkunde.* 1995.

CBS. CBS Statline. *Industrie en energie.* [Online]

—. CBS Statline. *Internationale handel.* [Online] CBS.

Centraal, Milieu. *Waterkracht.* [Online]

Certiq. 2008. Begrippen. *Certiq.* [Online] Certiq, 2008.

Dale, Van. 1991. *Handwoordenboek der Nederlandse taal.* Utrecht/Antwerpen : Van Dale Lexicografie, 1991.

de Jong, D.J., van Katwijk, M.M. en Brinkman, A.G. 2005. *Kansenkaart zeegras Waddenzee - Potentiële groeimogelijkheden voor zeegras in de Waddenzee (RIKZ/2005.013).* 2005.

Eco-energy. 2008. Eco-Energy Rietpol. *BP zonnepaneel.* [Online] Eco-energy, 2008. [Citaat van: 23 juli 2008.] http://www.eco-energy.nl/images/bp-solar-tech.jpg.

Ecofys. 2000. *Kansen voor energiewinning uit getijden in de Oosterschelde.* 2000.

Energieconversie, Werkgroep Onderzoek Duurzame. 2005. *Voorstudie Wetenschapsverkenning Duurzame energieconversie.* 2005.

EnergieNed. *Energie in nederland 2007.* [Online]

Engineering-online. *Waterkracht.* [Online]

EPZ. EPZ. *Facts & figures kernenergiecentrale.* [Online]

Essent. 2006. *Elektriciteit uit waterkracht - Stroom van schone energie.* 's Hertogenbosch : sn, 2006.

European Marine Energy Centre (EMEC). 2007. *Wave Energy Devices.* [Online] 2007.

Gemeenschappen, Europese. 2001. *Richtlijn 2001/77/EG van het Europees parlement en de raad.* 2001.

Gent, M.R.A. Van. 2002. *Low-exceedance wave overtopping events.* 2002.

Gent, M.R.A. van. 2002. *Low-exceedance wave-overtopping events.* Delft : sn, 2002.

Gent, Van. 2002. 2002.

Holland Solar. 2005. *Transitiepad zonnestroom.* 2005.

—. 2007. *Zonne-energie - Feiten en cijfers.* 2007.

InfoNu. Electriciteit en energie (stroom). [Online]

International Energy Agency (IEA). 2007. *Trends in photovoltaic applications - Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2006.* 2007.

Kema. 2005. *Energie uit water - Elektrische modificatie van kunststoffen.* 2005.

Kennislink. 2007. Kennislink. *Blauwe energie.* [Online] 2007.

Kloosterman, Dr.ir. J.L. 2007. *Snelle reactors - Kerncentrales willen duurzaam zijn.* 2007.

Klunne, W.J. Microhydro. *Waterkracht in Nederland.* [Online]

Meer, J.W. van der. 1988. *Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack.* 1988.

Menkveld, M. 2004. *Energietechnologieën in relatie tot transitiebeleid (ECN-C--04-020).* 2004.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 2007. *Golfklimaat.* [Online] 2007.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Actuele waterdata. [Online]

Muralt, R.R.L. de. 1931. Klei of beton voor zeedijksverhooging? 1931.

Novem. 1999. *Protocol Monitoring Duurzame Energie.* 1999.

Olino. 2007. *Het instralingsdiagram.* [Online] 2007.

Redstack. 2007b. Redstack. *Blauwe energie - Potentieel.* [Online] 2007b.

—. 2007. Redstack. *Reverse Electro Dialysis from concept to realisation.* [Online] 2007.

Rijkswaterstaat. 2006. *Integrale verkenning Afsluitdijk.* 2006.

—. 2005. *Veiligheidstoetsing Afsluitdijk 2005: Toets op Veiligheid van de Afsluitdijk tegen overstromen volgens VTV 2004.* 2005.

Rijkswaterstaat, Ministerie van Verkeer en Waterstaat -. 2005. *Veiligheid Nederland in Kaart: Hoofdrapport onderzoek overstromingsrisico's.* 2005.

RWS, Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Rijkswaterstaat). 2005. *MER Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk (deel locatiekeuze en voorlopige inrichting).* 2005.

RWS, Rijkswaterstaat Directie IJselmeergebied. 2006. *Integrale Verkenning Afsluitdijk.* 2006.

Schiereck, G.J. 2000. *Introduction to bed, bank and shore protection.* 2000.

Schüttrumpf, H.F.R. 2001. *Loading of the inner slope of seadikes by wave overtopping.* 2001.

—. 2001. *Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen.* 2001.

Seebregts, A.J. en Volkers, C.H. 2005. *Monitoring Nederlandse Elektriciteitscentrales 2000-2004 (ECN-C--05-090).* 2005.

SenterNovem. 2007. *Waterkracht.* 2007.

SMO, Instituut. 2008. *Toekomst Afsluitdijk: Resultaten van een participatieve verkenning.* 2008.

Solar Access. 2007. *Zonnecellen.* [Online] 2007.

Sonneveld, P.J., Bodega, R. en Campen, J.B. 2003. *De ontwikkeling van een electrostatische Windenergie Convertor I - Samengevat eindrapport.* 2003.

Statkraft. 2007. Statkraft. *Statkraft to build worlds fist osmotic power plant.* [Online] 2007.

—. 2007. Statkraft. *The PRO concept.* [Online] Statkraft, 2007.

Stuvel, H.J. 1957. *Het Eerste Offensief: 25 Jaar Afsluitdijk 1932 - 28 mei - 1957.* 1957.

TAW. 1998. *Grondslagen voor waterkeren.* 1998.

—. 1988. *Leidraad Keuzemethodiek Dijk- en Oeverbekledingen.* 1988.

—. 1999. *Leidraad Zee- en Meerdijken.* 1999.

—. 1999. *Leidraad Zee- en Meerdijken - Basisrapport.* 1999.

—. 2002. *Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken.* 2002.

—. 2004. *Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen.* 2004.

—. 2003. *Technisch Rapport Steenzettingen: Achtergronden.* 2003.

—. 2003. *Technisch Rapport Steenzettingen: Ontwerp.* 2003.

—. 2001. *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies: Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden.* 2001.

—. 1999. *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen.* 1999.

Technology, Teamwork. *Tocardo.* [Online]

The Sun Factory. 2003. *Zonne-energie op de Afsluitdijk.* 2003.

Transitieplatform Duurzame Energievoorziening. 2006. *Status windenergie op land in Nederland.* 2006.

Traum, M.J. 2007. *Alternative, renewable, sustainable and green: What is the difference?* 2007.

van Duivendijk, J. 2004. *Water Power Engineering (Lecture notes CT5304).* 2004.

Waterstaat, Inspectie Verkeer en. 2006. *Primaire waterkeringen getoetst: Landelijke Rapportage Toetsing 2006.* 2006.

—. 2006. *Primaire waterkeringen getoetst: Landelijke Rapportage Toetsing 2006 - Achtergrondrapport, deel 2 Verbindende Waterkeringen.* 2006.

Waterstaat, Ministerie van Verkeer en. 2007. *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen.* 2007.

Wave Dragon Aps. 2007. Wave Dragon. *Principles.* [Online] 2007.

Wind Service Holland. 2008. Wind Service Holland. *Basisbegrippen windenergie.* [Online] 2008.

—. 2007b. Wind Service Holland. *Rejected Wind Farm "Afsluitdijk".* [Online] 2007b.

—. 2007a. Wind Service Holland. *Windenergie in Nederland - Statistieken per provincie.* [Online] 2007a.

Zaken, Ministerie van Economische. 2001. *Energie Onderzoek Strategie.* 2001.

Overige bronnen:

- Erosiebestendigheid van grasbekleding tijdens golfoverslag
- Wetten.nl: Wet op de Waterkering
- Helpdeskwater.nl: Wet- en regelgeving
- Veiligheidstoetsing Afsluitdijk 2005, 2 augustus 2005, versie 2?
- Afsluitdijk – Rapportage veiligheid tegen overstromen volgens het voorschrift toetsen op veiligheid, september 2005?
- Hydraulische Randvoorwaarden 2006
- Van Gerven
- TR Kistdammen en diepwanden in waterkeringen, TAW, november 2004;
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Toetsing Afsluitdijk, 2005;
- http://www.weerstationuithoorn.nl/Weer/Zonnestand.htm
- http://members.chello.nl/a.galen4/index_bestanden/Page1236.htm
- http://www.aetec.be/uploads/img/Zonnepanelen_Solar_Falus.jpg

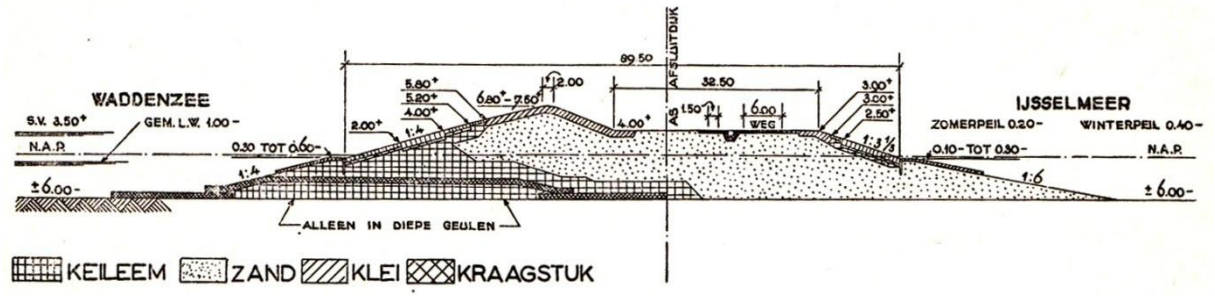
Referenties H6:

- Brochure Cultuurhistorie 9-2007, Rijksdienst voor archeologie, cultuurlandschap en monumenten
- http://www.racm.nl/content/rubriek-n6.asp?toc=n6
- E-mails Rijkswaterstaat van ing. H.J. Regeling
- Digitale tekeningen Afsluitdijk, RWS
- Integrale verkenning Afsluitdijk + bijlagen
- Sedimentatlas
- http://www.hmc-noordzee.nl
- http://www.waternormalen.nl
- http://www.waddenzee.nl/Habitat_en_Vogelrichtlijn.644.0.html
- http://www2.waddenzee.nl/index.php?id=206#344
- http://www.waddenzeesites.nl/dutch/hvr/html/hvr1.htm

APPENDICES

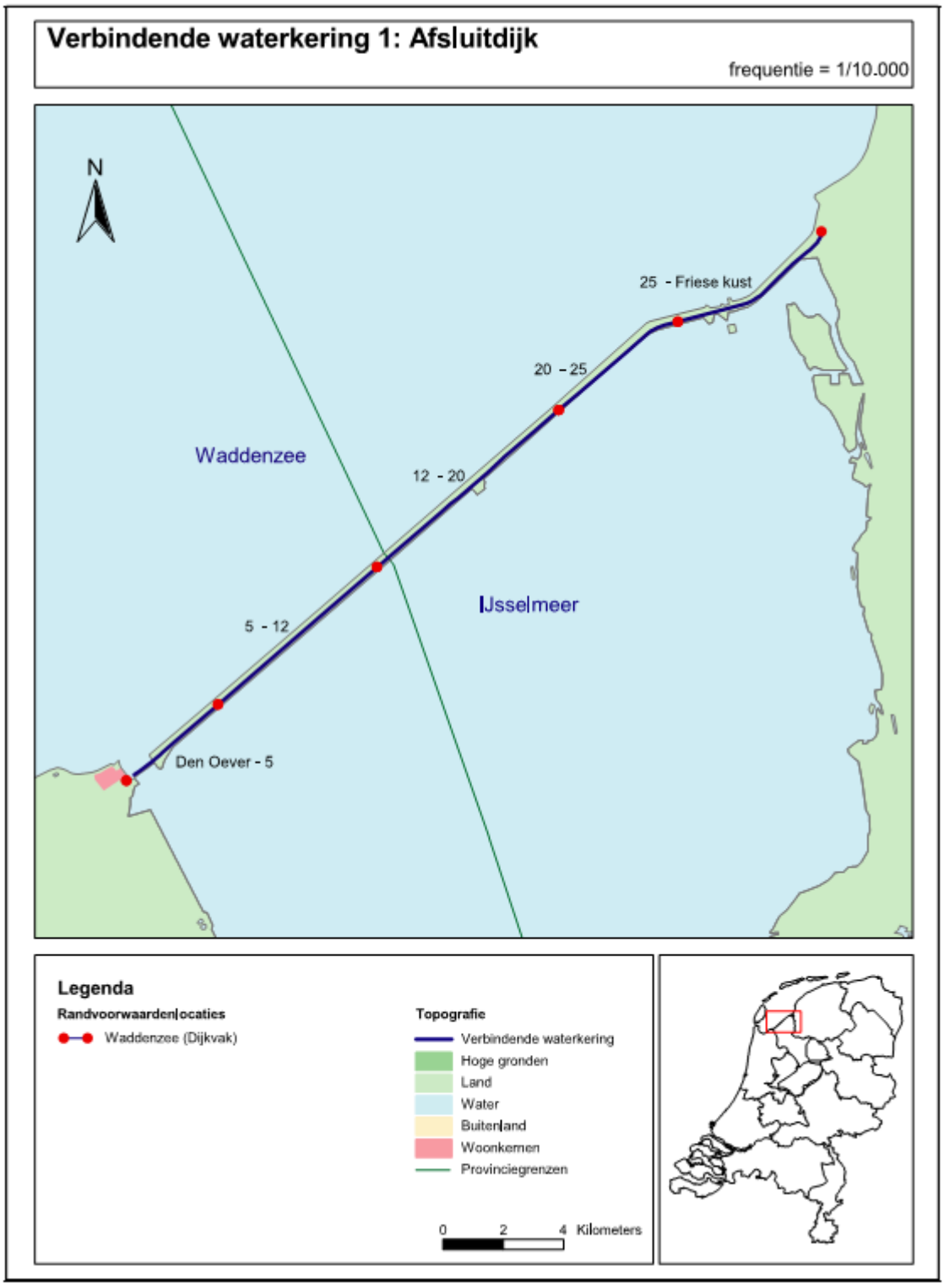
A Geschiedenis Afsluitdijk

In 1667 waren er al plannen om de toenmalige Zuiderzee af te sluiten (en droog te maken). Technisch waren deze plannen toen nog niet haalbaar, maar de Afsluitdijk en een aantal andere civieltechnische projecten zijn er wel een gevolg van. Lange tijd hierna was er geen aandacht voor de plannen tot een daartoe benoemde staatscommissie de aanbeveling had gedaan de Haarlemmermeer droog te maken.
Er volgde in de 19e eeuw vele plannen voor inpoldering van de Zuiderzee (al dan niet gecombineerd met de Wadden). Om orde te scheppen in de chaotische plannen en sterk van elkaar afwijkende grondgedachten werd in 1886 de Zuiderzeevereniging opgericht. Het doel van deze vereniging was: "Het instellen van een technisch en financieel onderzoek omtrent de afsluiting, mede ter voorbereiding ener latere gedeeltelijke drooglegging van de Zuiderzee, de Wadden en de Lauwerszee." Met technische nota's van deze vereniging werd als het ware het fundament voor de Zuiderzeewerken, waar de Afsluitdijk onderdeel van is, gelegd. Na vele jaren werd in 1918, na behandeling in de Tweede en Eerste Kamer, de wet tot afsluiting en droogmaking van de Zuiderzee aangenomen. Nu kon worden begonnen met het uitvoeren van metingen en berekeningen om de technische haalbaarheid, maar ook de gevolgen voor de waterbeweging in de Waddenzee vast te stellen.
In 1918 werden plannen voor de organisatie en uitvoering van de Zuiderzeewet gemaakt, waarna in 1922 gestart zou worden met het maken van een kleine proefpolder waarmee de nodige ervaring zou kunnen worden opgedaan. In tussentijd werden verschillende rekenmethoden getoetst met praktijkvoorbeelden en werden modelproeven uitgevoerd. Het originele tracé (van Wieringen in Noord-Holland naar Piaam) werd in 1926 om civieltechnische redenen gewijzigd in het tracé van Wieringen naar Zurich.
De versnelde uitvoering van de Zuiderzeewerken kon in 1926 van start gaan, waarmee de realisatie van de Afsluitdijk (inclusief uitwateringssluizen bij Den Oever en Kornwerderzand) na 6 jaar in 1932 een feit was. Het dwarsprofiel van de Afsluitdijk had een opbouw zoals weergegeven in Figuur A.1.



Figuur A.1 Dwarsprofiel van de Afsluitdijk tussen Wieringen en Friesland (Stuvel, 1957)

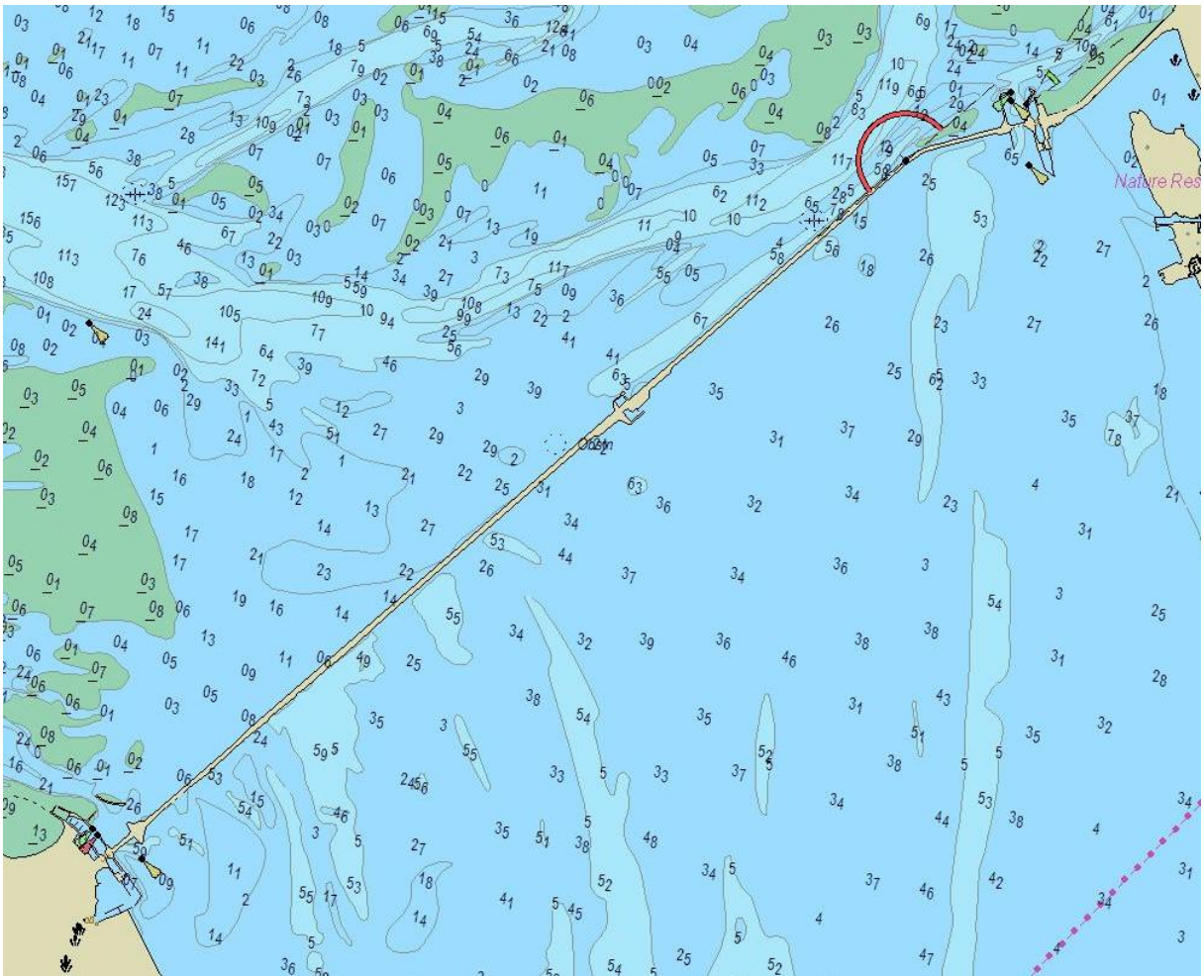
B Overzichtskaart Afsluitdijk



Figuur B.1 Overzichtskaart Afsluitdijk (bron: HR2006)

C Waterkaart

C.1 Overzichtskaart Afsluitdijk



Figuur C.1 Kaart met waterdiepten (ten opzichte van gemiddeld laag laagwaterspring (GLLWS)) (Chartworx)

Opmerking een onderstreepte waarde geeft de waarde boven het reductievlak aan!

De waarden op de kaart (Figuur C.1) kunnen worden omgerekend naar een waarde ten opzichte van NAP met de volgende vergelijking:

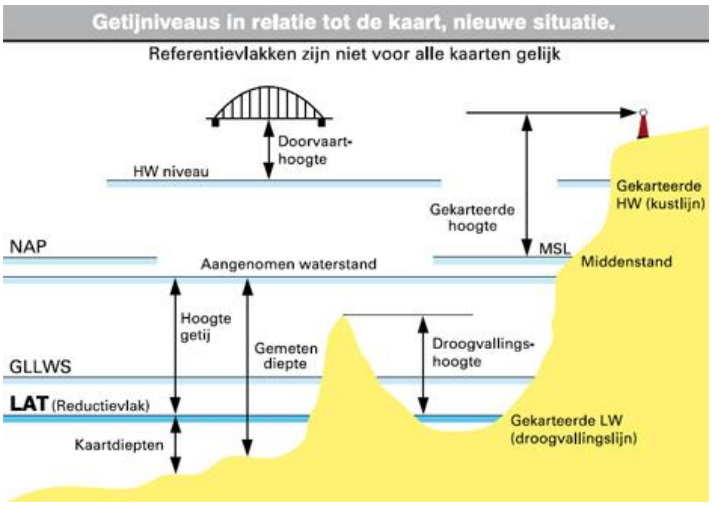
$$z = GLLWS - d \qquad \text{(C.1)}$$

met: $GLLWS = MSL - 1{,}00$

waarin:

z	=	bodemhoogte ten opzichte van NAP	[m+NAP]
$GLLWS$	=	gemiddeld laag laagwaterspring	[m+NAP]
MSL	=	mean sea level	[m+NAP]
d	=	kaartdiepte	[m]

De waarde van 1,00 m is het verschil NAP – GLLWS (zie Figuur C.2) dat van toepassing is voor de Waddenzee. Dit is bepaald aan de hand van het verschil NAP – LAT (Lowest Astronomical Tide) van 1,20 m en het verschil GLLWS – LAT van 0,20 m.



Figuur C.2 Getijniveaus in relatie tot kaartdiepte

C.2 Waterkaart hydraulische randvoorwaarden

De hydraulische randvoorwaarden zijn gegeven ter plaatse van de knik in de Afsluitdijk 1.000 m uit de buitenkruinlijn van de Afsluitdijk. In Figuur C.3 is een raai loodrecht op de knik van de Afsluitdijk getekend met cirkels en de bijbehorende straal (gemeten ten opzichte van de buitenkruinlijn van de Afsluitdijk).



Figuur C.3 Kaart met waterdiepten ter plaatse van de knik van de Afsluitdijk (ten opzichte van gemiddeld laag laagwaterspring (GLLWS)) (Chartworx)

De waarden op de kaart (Figuur C.3) kunnen worden omgerekend naar een waarde ten opzichte van NAP met vergelijking (C.1). De bijbehorende diepte zijn weergegeven in Tabel C.1.

Tabel C.1 Omrekening kaartdiepte naar bodemdiepte

s (m)	d (m)	z (m+NAP)
0,00	9,80	-10,80
200,00	3,10	-4,10
400,00	2,60	-3,60
600,00	3,90	-4,90
800,00	1,40	-2,40
964,61	2,50	-3,50

D Resultaten veiligheidstoetsing 2006

D.1 Toetsresultaten

In Figuur D.1, Tabel D.1 en Tabel D.2 zijn de toetsresultaten van de veiligheidstoetsing van de Afsluitdijk weergegeven.



Figuur D.1 Overzicht van de Afsluitdijk met het bijbehorende veiligheidsoordeel (bron:LRT2006 deel 2)

Tabel D.1 Toetsresultaten dijken en dammen Afsluitdijk

toetscriterium per type	lengte/ aantal	voldoet aan de norm		voldoet niet aan de norm	geen oordeel
		goed	voldoende	onvoldoende	
	(km/st)	(km/st)	(km/st)	(km/st)	(km/st)
totaal	29,9			29,9	
hoogte	29,8	1,1		28,7	
stabiliteit					
piping en heave	29,9	4,8	25,1		
macrostabiliteit buitenwaarts	29,9	1,4	28,5		
macrostabiliteit binnenwaarts	29,8	28,6	1,2		
microstabiliteit			29,9		
bekleding					
steenzetting	32,2	5,6		1,8	24,8
asfalt					
grasmat	29,9	1,7		28,2	
overige bekledingen					
voorland					
afschuiving	29,9		29,9		
zettingsvloeiing	29,9		29,9		
niet-waterkerende objecten					
bebouwing	18	2	5		11
kabels en leidingen	40	8			32
bomen en overige begroeiing					
overige niet-waterkerende objecten	38	20	14		4

Tabel D.2 Toetsresultaten kunstwerken Afsluitdijk

toetscriterium per type	aantal	voldoet aan de norm		voldoet niet aan de norm	geen oordeel
		goed	voldoende	onvoldoende	
	(st)	(st)	(st)	(st)	(st)
totaal	4			4	
hoogte	4		2	2	
stabiliteit					
constructie en grondlichaam	4		1	3	
constructieonderdelen	4			4	
piping en heave	4	1		3	
voorland					
betrouwbaarheid sluiting	4			4	

D.2 Toelichting resultaten

Hieronder zijn de bevindingen van de beheerder, provincie en het rijk weergegeven (Waterstaat, 2006).

D.2.1 Bevindingen beheerder

“De toetsing van de Afsluitdijk heeft bestaan uit twee onderdelen. Omdat de toetsing van de verbindende waterkering volgens de regels van het VTV voor een deel van de kering de score 'onvoldoende' opleverde is daarna een achterlandstudie uitgevoerd. Hieruit blijkt dat het systeem van de voorliggende kering in combinatie met de achterliggende dijkringgebieden, een 'onvoldoende' resultaat oplevert.

Door falen van de Afsluitdijk kan het toetspeil op het IJsselmeer met enkele decimeters stijgen. De achterliggende dijken kunnen deze hogere belasting niet opvangen. Bovendien voldoet een aantal kunstwerken in het achterland ook niet zonder de extra belasting. Het oordeel in stap 2 is daarom

'onvoldoende'. De methode voor de achterlandstudie van de Afsluitdijk is door het ENW goedgekeurd.
De score op basis van de eerste stap, de beoordeling op basis van de toetssporen volgens het VTV, levert voor het grootste deel van de dijken de score 'onvoldoende' op hoogte op, vanwege onvoldoende erosiebestendigheid van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud. Voor een groot deel van de steenbekleding is 'geen oordeel' gegeven, omdat voor de aanwezige bekledingstypen geen gedetailleerde toetsmethoden beschikbaar zijn. De dijken voldoen aan de norm met betrekking tot de stabiliteit. Van de vier aanwezige kunstwerken scoren twee 'onvoldoende' op hoogte, drie 'onvoldoende' op stabiliteit constructie en grondlichaam en piping en heave en scoren vier 'onvoldoende' op sterkte constructieonderdelen en betrouwbaarheid sluiting. Van de aanwezig niet-waterkerende objecten (NWO) voldoet ruim de helft aan de norm. Van de resterende objecten is nog onvoldoende informatie aanwezig. De lei- en havendammen voldoen alle aan de norm, met uitzondering van de bekleding. Twee van de drie havendammen scoren 'onvoldoende' op het aspect bekleding terwijl voor drie havendammen nog geen oordeel is gegeven.
De resultaten van de technische toetsing komen overeen met het beheerdersoordeel. Het gedrag van de kering geeft geen aanleiding om af te wijken van de technische beoordeling. Ook voor die aspecten waar nog geen oordeel is gegeven, neemt de beheerder dit over omdat op basis van de opgetreden omstandigheden geen conclusies zijn te trekken over het gedrag van de kering onder maatgevende omstandigheden.
De beheerder merkt op dat de Afsluitdijk naast de functie als primaire, voorliggende kering, nog andere functies heeft. Dit betreft bijvoorbeeld de scheiding van zoet/zoutwater en de verkeersfunctie. Deze functies zouden voor langere tijd wegvallen onder maatgevende omstandigheden, ook indien in stap 2 van de toetsing (de achterlandstudie) wel een voldoende score voor de waterkerende functie zou zijn behaald."

D.2.2 Bevindingen provincie

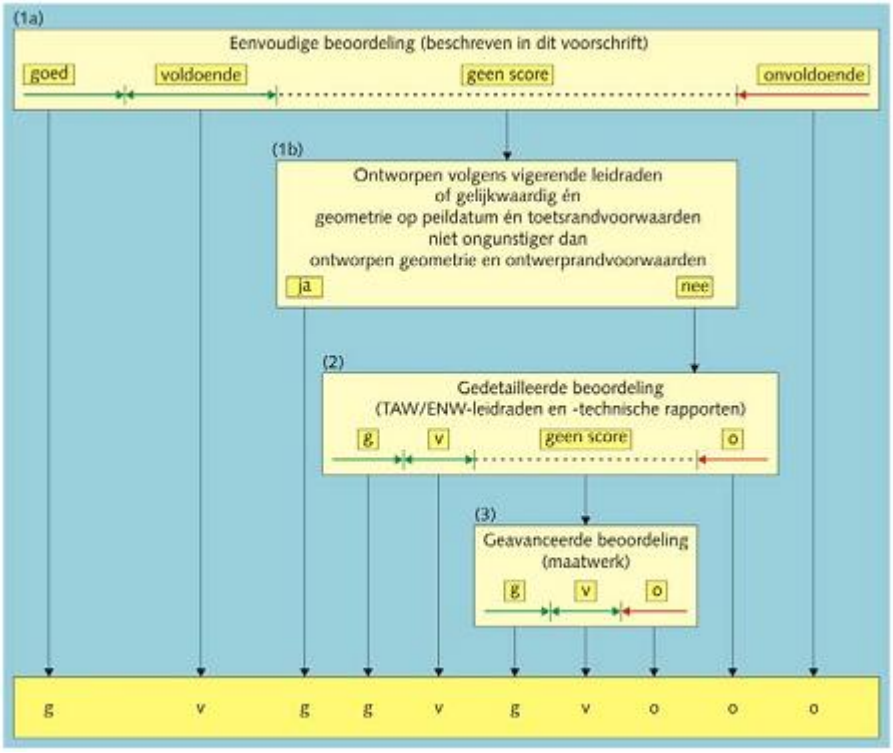
"De provincie sluit zich aan bij het oordeel van de beheerder."

D.2.3 Bevinding Rijk

"De beoordeling op veiligheid is uitgevoerd aan de hand van het VTV. De hydraulische randvoorwaarden zijn in aansluiting op het VTV in 2004 bepaald, omdat het HR2001 nog uitgaat van de oude normfrequentie van 1/1.430 per jaar. Het Rijk sluit zich aan bij het oordeel en de bevindingen van de beheerder en provincie.
Bij het opstellen van het beoordelingsprofiel voor het toetsen van niet-waterkerende objecten (NWO) is de LTV uit 1999 gebruikt en niet het VTV."

E Beoordelingsschema toetsresultaten

In Figuur E.1 is het beoordelingsschema voor de toetsing weergegeven.



Figuur E.1 Beoordeling van eenvoudig naar geavanceerd per beoordelingsschema (Waterstaat, 2007)

Hieronder worden de verschillende stappen nader toegelicht (Waterstaat, 2007).

"Stap 1: eenvoudige beoordeling en gehanteerde ontwerpregels
De beoordeling start met eenvoudig toe te passen criteria. De deelscore is 'goed' of 'voldoende' indien aan de criteria wordt voldaan. In enkele gevallen is het mogelijk om op grond van de eenvoudige methode de score 'onvoldoende' toe te kennen. Indien op grond van de eenvoudige methode geen score kan worden bereikt, dan gaat de beoordeling verder met een meer gedetailleerde beoordeling (stap 2).

Stap 2: gedetailleerde beoordeling
De moeilijkheidsgraad van deze gedetailleerde beoordeling ligt op het niveau van TAW/ENW-ontwerpleidraden en is met behulp van deze leidraden en bijbehorende technische rapporten uit te voeren. Is het niet mogelijk om tot een score 'goed', 'voldoende' of 'onvoldoende' te komen op grond van de gedetailleerde beoordeling, dan wordt de toetsing voortgezet met een geavanceerde beoordeling (stap 3).

Stap 3: geavanceerde beoordeling
De geavanceerde beoordeling is een verdieping van de gedetailleerde toets via bijvoorbeeld een nadere uitwerking van randvoorwaarden, aanvullende gegevensverzameling, toepassing van niet vastgestelde of genoemde rekenmethodes of variatie met faalkansruimte per mechanisme.

Een geavanceerde beoordeling is vaak specifiek op de te beoordelen situatie gericht en zal doorgaans met behulp van specialisten op het betreffende vakgebied moeten worden uitgevoerd.

Uiteindelijk zal, ook weer met inachtneming van het waargenomen gedrag, de beoordeling resulteren in een eindscore ‘goed’ (g), ‘voldoende’ (v) of ‘onvoldoende’ (o).

Een onderscheid tussen gedetailleerd toetsen en geavanceerd toetsen is dat gedetailleerd toetsen gebaseerd is op door TAW/ENW vastgestelde kennis die is vastgelegd in leidraden en technische rapporten en waarnaar verwezen wordt in de betreffende toetsingsregels.
Geavanceerd toetsen is veelal niet gebaseerd op door TAW/ENW vastgestelde kennis. In geval van geavanceerd toetsen zal aangetoond moeten worden dat de methode terecht toegepast wordt. Hier ligt de bewijslast bij de toetser in plaats van bij TAW/ENW. De toetser kan hiervoor advies inwinnen bij ENW of de Helpdesk Water (zie hoofdstuk 6 van het Centrale Gedeelte).

Een ander onderscheid tussen gedetailleerd en geavanceerd toetsen is gelegen in de complexiteit. Geavanceerde methodes zijn veelal complexer dan gedetailleerde toetsingsregels.

De geavanceerde beoordeling kan ook bestaan uit de resultaten van een deskundigenraadpleging, een proefbelasting of modelonderzoek.

Voor ondersteuning bij het uitvoeren van de geavanceerde beoordeling kan een beroep gedaan worden op de Helpdesk Water (zie hoofdstuk 6 van het Centrale Gedeelte).”

F Toelichting toetsresultaten

Bij de toetsing van het dijklichaam is onderscheid gemaakt tussen toetsing van de hoogte, de stabiliteit en de niet-waterkerende objecten. De hoogte wordt in paragraaf F.1 behandeld. De stabiliteit komt in paragraaf F.2 aan de orde.

F.1 Hoogte

Bij het toetsen van de hoogte zijn het overslagdebiet, de kruinhoogtemarge, de mogelijkheid op erosie ten gevolge van overslaand water en de mogelijkheid op afschuiving van het binnentalud beoordeeld. Deze punten worden hieronder behandeld.

F.1.1 Overslagdebiet

Het overslagdebiet is bij de toetsing van de Afsluitdijk vastgesteld met behulp van het computerprogramma PC-Overslag. De berekeningen in PC-Overslag zijn gebaseerd op vergelijking (S.2) en vergelijking (S.6) (zie appendix S). De ingevoerde waarden en resultaten van PC-Overslag zijn in Tabel F.1 weergegeven.

Tabel F.1 Ingevoerde waarden en resultaten PC-Overslag

dwarsprofiel	h_{kr} (m)	cotanα (-)	H_s (m)	T_p (s)	β (°)	$h_{mhw;2001}$ (m)	$z_{2\%}$ (m)	$z_{2\%}+h_{mhw;2001}$ (m)	q (l/s/m)
0,6	5,17	4,07	0,60	3,20	0	4,95	1,39	6,34	74,2
0,6 vs 2[1]	5,36	6,49	0,60	3,20	0	4,95	0,91	5,86	6,7
1,2	5,24	7,75	0,60	3,20	0	4,95	0,68	5,63	6,9
1,6	7,03	2,90	2,45	7,42	0	4,95	7,30	12,25	307,7
1,93	7,19	3,48	2,50	6,30	0	4,95	6,78	11,73	200,2
4,65	7,84	3,80	2,45	7,42	0	4,95	5,45	10,40	41,0
7,6	7,62	2,48	2,45	7,42	0	5,00	6,12	11,12	93,6
12,55	7,90	3,85	2,45	7,42	0	5,05	5,54	10,59	46,5
15,37	7,85	3,95	2,45	7,42	0	5,05	5,28	10,33	40,3
16,89	7,84	3,75	2,45	7,42	0	5,05	5,67	10,72	55,8
17,35	7,86	3,96	2,45	7,42	0	5,05	5,65	10,70	53,7
20,51	7,86	4,28	2,45	7,42	0	5,10	5,23	10,33	41,0
24,64	7,81	4,03	2,45	7,42	0	5,10	5,15	10,25	41,2
26,05	8,28	4,21	2,45	7,42	0	5,15	5,16	10,31	21,0
26,35	7,62	2,73	1,30	6,30	0	5,15	4,26	9,41	11,0
26,49	7,62	2,54	1,30	6,30	0	5,15	4,22	9,37	9,9
27,03	5,50	2,26	0,60	3,20	0	5,15	1,90	7,05	76,1
30,16	7,11	3,03	2,45	7,42	0	5,15	5,26	10,41	124,7

[1]: bij profiel 0,6 vs 2 is als kruinhoogte een hoger punt genomen dan de kniklijn van het talud.

Afhankelijk van het golfoverslagdebiet dient de kruinhoogtemarge en/of de bekleding op het binnentalud getoetst te worden (Waterstaat, 2007):

- $q \leq 0{,}1$ l/s/m: de kruinhoogtemarge dient getoetst te worden;
- $0{,}1 \leq q \leq 10$ l/s/m: de bekleding van het binnentalud en vervolgens de kruinhoogtemarge dienen getoetst te worden;
- $q \geq 10$ l/s/m: de kruinhoogtemarge en de bekleding van het binnentalud dienen getoetst te worden.

F.1.2 Kruinhoogtemarge

Voor het bepalen van de kruinhoogtemarge is de volgende vergelijking gebruikt:

$$h_{krm} = h_{kr} - \left(h_{mhw;2001} + h_t\right) \qquad \text{(Waterstaat, 2007)} \qquad \text{(F.1)}$$

waarin:

h_{krm}	=	kruinhoogtemarge	[m]
h_{kr}	=	kruinhoogte	[m+NAP]
$h_{mhw;2001}$	=	maatgevende hoogwaterstand voor het jaar 2001	[m+NAP]
h_t	=	toeslagen voor bui-ocsillaties, buistoten en seiches	[m]

De kruinhoogtemarge is per dwarsprofiel weergegeven in Tabel F.2.

Tabel F.2 Kruinhoogtemarge

dwarsprofiel	h_{kr} (m)	$h_{mhw;2001}$ (m)	h_t (m)	h_{krm} (m)
0,6	5,17	4,95	0,00	0,22
0,6 vs 2[1]	5,36	4,95	0,00	0,41
1,2	5,24	4,95	0,00	0,29
1,6	7,03	4,95	0,00	2,08
1,93	7,19	4,95	0,00	2,24
4,65	7,84	4,95	0,00	2,89
7,6	7,62	5,00	0,00	2,62
12,55	7,90	5,05	0,00	2,85
15,37	7,85	5,05	0,00	2,80
16,89	7,84	5,05	0,00	2,79
17,35	7,86	5,05	0,00	2,81
20,51	7,86	5,10	0,00	2,76
24,64	7,81	5,10	0,00	2,71
26,05	8,28	5,15	0,00	3,13
26,35	7,62	5,15	0,00	2,47
26,49	7,62	5,15	0,00	2,47
27,03	5,50	5,50	0,00	0,35
30,16	7,11	5,15	0,00	1,96

[1]: bij profiel 0,6 vs 2 is als kruinhoogte een hoger punt genomen dan de kniklijn van het talud.

F.1.3 Gedetailleerde toets erosie door golfoverslag

Bij de gedetailleerde toets op erosie door golfoverslag wordt de optredende snelheid met de maximaal toelaatbare snelheid vergeleken, hierbij dient de optredende snelheid kleiner te zijn dan de maximaal toelaatbare snelheid. Hierbij is vergelijking (F.2) gebruikt:

$$v_r = 700\frac{H_s}{T_p}\left(0{,}085-\frac{H_s}{L_{0p}}\right)\left(1-\frac{z}{z_q}\right)^{0,5}\tan\alpha_0 \qquad \text{(TAW2004)} \qquad \text{(F.2)}$$

met: $L_{0p}=\frac{gT_p^2}{2\pi}$

waarin:

v_r	=	oploopsnelheid ter plaatse van het te toetsen punt	[m/s]
H_{m0}	=	spectrale golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
T_p	=	piekperiode bij de teen van de dijk	[s]
z	=	hoogte van het te toetsen punt op het buitentalud ten opzichte van toetspeil + toeslagen	[m]
z_q	=	golfoploophoogte behorende bij een oploopdebiet q van 0.1 l/m/s op een oneindig lang talud met een helling gelijk aan het buitentalud, in dit geval berekend ten opzichte van toetspeil + toeslagen	[m]
L_{0p}	=	golflengte op diep water die behoort bij de piekperiode T_p	[m]
α_0	=	gemiddelde hellingshoek van het buitentalud	[-]

Deze berekeningen zijn per dwarsprofiel weergegeven in Tabel F.3.

Tabel F.3 Gedetailleerde toets erosie door golfoverslag

dwars-profiel	H_s (m)	T_p (s)	cotanα (-)	L_0 (m)	h_{kr} (m)	$h_{mhw;2001}$ (m)	$h_{q=0,1}$ (m)	z (m)	z_q (m)	v_r (m/s)	t_s (uur)	t_{sr} (uur)	$v_{r;max}$ (m/s)	score[2]
0,6 vs 2[1]	0,60	3,20	6,49	15,99	5,36	4,95	5,87	0,41	0,92	0,71	3,3	2	4	g
1,2	0,60	3,20	7,75	15,99	5,24	4,95	5,62	0,29	0,67	0,61	2,3	1	4,8	g
1,6	2,45	7,42	2,90	85,96	7,03	4,95	15,16	2,08	10,21	4,02	45,0	36	2,2	o
1,93	2,50	6,30	3,48	61,97	7,19	4,95	12,54	2,24	7,59	2,99	45,0	32	2,3	o
4,65	2,45	7,42	3,80	85,96	7,84	4,95	12,20	2,89	7,25	2,66	35,2	21	2,45	o
7,6	2,45	7,42	2,48	85,96	7,62	5,00	13,16	2,62	8,16	4,34	45,0	31	2,3	o
12,55	2,45	7,42	3,85	85,96	7,90	5,05	12,42	2,85	7,37	2,66	35,8	22	2,45	o
15,37	2,45	7,42	3,95	85,96	7,85	5,05	12,06	2,80	7,01	2,56	34,6	21	2,45	o
16,89	2,45	7,42	3,75	85,96	7,84	5,05	12,61	2,79	7,56	2,77	36,0	23	2,4	o
17,35	2,45	7,42	3,96	85,96	7,86	5,05	12,58	2,81	7,53	2,61	36,0	23	2,4	o
20,51	2,45	7,42	4,28	85,96	7,86	5,10	12,04	2,76	6,94	2,37	34,0	20	2,5	g
24,64	2,45	7,42	4,03	85,96	7,81	5,10	11,93	2,71	6,83	2,52	33,6	20	2,5	o
26,05	2,45	7,42	4,21	85,96	8,28	5,15	11,94	3,13	6,79	2,28	31,6	17	2,6	g
26,35	1,30	6,30	2,73	61,97	7,62	5,15	10,23	2,47	5,08	2,43	12,8	7	3,1	g
26,49	1,30	6,30	2,54	61,97	7,62	5,15	10,11	2,47	4,96	2,58	12,6	6	3,3	g
27,03	0,60	3,20	2,26	15,99	5,50	5,15	7,23	0,35	2,08	2,51	12,3	10	2,8	n.v.t.[3]
30,16	2,45	7,42	3,03	85,96	7,11	5,15	12,09	1,96	6,94	3,65	36,6	26	2,4	o

[1]: bij profiel 0,6 vs 2 is als kruinhoogte een hoger punt genomen dan de kniklijn van het talud.
[2]: 'g' = goed; 'o' = onvoldoende
[3]: geavanceerd toetsen is noodzakelijk door een te kleine kruinhoogtemarge

F.1.4 Gedetailleerde toets op afschuiven

Bij de gedetailleerde toets op afschuiven wordt de optredende snelheid met de maximaal toelaatbare snelheid vergeleken, hierbij dient de optredende snelheid kleiner te zijn dan de maximaal toelaatbare snelheid. Hierbij is de bovengrensvergelijking van Joustra en Edelman voor afstromend water evenwijdig aan taluds boven water voor een homogeen oneindig lang talud:

$$\tan\phi \geq \frac{\gamma_d \gamma_{m,\phi} \gamma_n \rho_g g \sin\alpha - \gamma_{m,\phi}\gamma_{m,\rho}\frac{c}{\gamma_{m,c} d}}{\rho_g g \cos\alpha - \rho_w g \cos\alpha} \qquad \text{(TAW, 2001)} \qquad \text{(F.3)}$$

waarin:

c	=	cohesie	[N/m^2/m]
d	=	beschouwde laagdikte (loodrecht op talud gemeten)	[m]
g	=	zwaartekracht	[m/s^2]
α	=	helling van het talud	[°]
γ_d	=	modelfactor	[-]
$\gamma_{m,c}$	=	materiaalfactor voor de cohesie	[-]
$\gamma_{m,\phi}$	=	materiaalfactor voor de hoek van inwendige wrijving	[-]
$\gamma_{m,\rho}$	=	materiaalfactor voor de volumieke massa	[-]
γ_n	=	schadefactor	[-]
ϕ	=	hoek van inwendige wrijving	[°]
ρ_w	=	soortelijke massa van water	[kg/m^3]
ρ_g	=	soortelijke massa van grond	[kg/m^3]

Deze berekening is per dwarsprofiel weergegeven in Tabel F.4.

Tabel F.4 Gedetailleerde toets op afschuiven van het binnentalud

dwars-profiel	cotanα (-)	c (N/m^2)	d (m)	g (m/s^2)	α (°)	γ_d (-)	$\gamma_{m,c}$ (-)	$\gamma_{m,\phi}$ (-)	$\gamma_{m,\rho}$ (-)	γ_n (-)	ϕ (°)	ρ_w (kg/m^3)	ρ_g (kg/m^3)	toets[1]
0,6	3,1	1200	0,3	9,81	18	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	s
1,2	3,70	1200	0,30	9,81	15	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	s
1,6	3,30	1200	0,30	9,81	17	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	s
1,93	2,50	1200	0,30	9,81	23	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
4,65	2,30	1200	0,25	9,81	25	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
7,6	1,60	1200	0,50	9,81	36	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
12,55	2,40	1200	0,40	9,81	24	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
15,37	2,40	1200	0,40	9,81	24	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
16,89	2,20	1200	0,60	9,81	26	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
17,35	2,30	1200	0,70	9,81	25	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
20,51	2,40	1200	0,70	9,81	24	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
24,64	2,70	1200	0,40	9,81	21	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
26,05	2,70	1200	0,35	9,81	21	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
26,35	2,50	1200	0,40	9,81	23	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
26,49	2,20	1200	0,30	9,81	26	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i
27,03	3,30	1200	0,30	9,81	17	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	s
30,16	2,60	1200	0,35	9,81	22	1,1	1,25	1,1	1,0	1,1	31,7	1024	1730	i

[1]: 's' = stabiel; 'i' = instabiel

F.1.5 Eindscore hoogte

Het eindoordeel voor de toetsing op hoogte luidt als volgt (Rijkswaterstaat, 2005):
"Samenvattend krijgt de Afsluitdijk voor het toetsspoor hoogte voor slechts twee van de getoetste profielen de score goed. De overige vakken krijgen de score onvoldoende. Door een onvoldoende kruinhoogte treedt er dusdanig veel overslag op dat de dijk minder goed begaanbaar is en daarnaast is de bekleding van het binnentalud niet bestand tegen de grote hoeveelheden overslaand water (erosie en afschuiven). Uitzondering vormen de profielen aan het begin van de dijk (0.6 en 1.2). Vak 27.03 moet formeel geavanceerd getoetst worden door de beperkte kruinhoogtemarge. Gezien de onvoldoende hoogte van het aansluitende deel van de dijk is verwachting dat met een geavanceerde toets niet tot een score 'goed' gekomen kan worden."

Tabel F.5 Eindscore hoogte

dwarsprofiel (km)	golfoverslag	afschuiven binnentalud	eindscore
0,6	goed	goed	goed
1,2	goed	goed	goed
1,6	onvoldoende	goed	onvoldoende
1,93	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
4,65	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
7,6	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
12,55	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
15,37	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
16,89	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
17,35	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
20,51	goed	onvoldoende	onvoldoende
24,64	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
26,05	goed	onvoldoende	onvoldoende
26,35	goed	onvoldoende	onvoldoende
26,49	goed	onvoldoende	onvoldoende
27,03	n.v.t.	goed	geavanceerd
30,16	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende

F.2 Stabiliteit

F.2.1 Piping en heave

De stabiliteit met betrekking tot piping en heave is getoetst door het toetsen van de aanwezige kwelweglengte aan de minimale kwelweglengte. Dit wordt gedaan met de methodes Bligh en Sellmeijer.

Methode Bligh

De vergelijking voor de methode Bligh luidt als volgt:

$$\frac{L}{18} \geq \Delta H - 0,3d \qquad \text{(TAW, 2001)} \qquad \text{(F.4)}$$

met: $\Delta H = h_{mhw;2001} + h_t - h_{mlw}$

waarin:

L	=	kwelweglengte	[m]
ΔH	=	hoogteverschil tussen toetspeil+toeslagen en de waterstand achter de kering	[m]
d	=	dikte van het afdekkend pakket slecht doorlatende lagen bij het uittredepunt	[m]

Tabel F.6 Toetsing kwelweglengte volgens methode Bligh

dwarsprofiel (km)	$h_{mhw;2001}$ (m+NAP)	h_{mlw}[1] (m+NAP)	$C_{cr;Bligh}$ (m)	$L_{aanwezig}$ (m)	$L_{benodigd}$ (m)	toets[2]
0,6	4,95	-2,35	18	59,0	131,4	vn
1,2	4,95	-2,35	18	57,5	131,4	vn
1,6	4,95	-2,35	18	99,0	131,4	vn
1,93	4,95	-2,35	18	100,0	131,4	vn
2,14	4,95	-2,35	18	140,0	131,4	v
2,85	4,95	-2,35	18	99,0	131,4	vn
7,4	5,00	-2,30	18	99,0	131,4	vn
12,55	5,05	-2,30	18	102,0	132,3	vn
16,89	5,05	-2,25	18	130,0	131,4	vn
20,51	5,10	-2,20	18	100,0	131,4	vn
24,64	5,10	-2,15	18	100,0	130,5	vn
26,05	5,10	-2,15	18	200,0	130,5	v
26,35	5,15	-2,10	18	100,0	130,5	vn
26,49	5,15	-2,10	18	100,0	130,5	vn
27,03	5,15	-2,10	18	60,0	130,5	vn
27,52	5,15	-2,10	18	90,0	130,5	vn
30,16	5,15	-2,10	18	140,0	130,5	v

[1]: minimum waterstanden IJsselmeer bij een frequentie van 1/10.000 per jaar (Rijkswaterstaat, 2004)
[2]: 'v' = voldoet; 'vn' = voldoet niet

Methode Sellmeijer

De vergelijking voor de methode Sellmeijer luidt als volgt:

$$\Delta H_c = d^{\beta} L^{1-\beta} \left(\frac{g d_{70}^3}{\nu k L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(0{,}25 - 0{,}037 \ln \left(\frac{g d_{70}^3}{\nu k L} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \qquad \text{(TAW, 2001)} \qquad \text{(F.5)}$$

met: $\beta = \dfrac{0{,}28}{\left(\dfrac{d}{L} \right)^{2{,}8} - 1}$

waarin:

L	=	kwelweglengte	[m]
ΔH	=	hoogteverschil tussen toetspeil+toeslagen en de waterstand achter de kering	[m]
d	=	dikte van het afdekkend pakket slecht doorlatende lagen bij het uittredepunt	[m]
d_{70}	=	70-percentielwaarde van de korrelverdeling	[m]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s^2]
k	=	doorlatendheid	[m/s]
ν	=	kinematische viscositeit van water	[m^2/s]

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de methode Sellmeijer alleen geldig is onder de volgende randvoorwaarde: L > 10ΔH.

Tabel F.7 Toetsing volgens methode Sellmeijer

dwarsprofiel (km)	L (m)	ΔH (m)	10ΔH (m)	Sellmeijer[1] (-)	ΔH_c[2] (m)	toets[4]
0,6[3]	74,0	7,30	73,0	g	12,43	v
1,2[3]	74,5	7,30	73,0	g	12,43	v
1,6	99,0	7,30	73,0	g	16,54	v
1,93	100,0	7,30	73,0	g	16,71	v
2,85	99,0	7,30	73,0	g	16,54	v
7,4	99,0	7,30	73,0	g	16,54	v
12,55	102,2	7,30	73,0	g	17,07	v
16,89	130,0	7,35	73,5	g	21,62	v
20,51	100,0	7,30	73,0	g	16,71	v
24,64	100,0	7,30	73,0	g	16,71	v
26,35	100,0	7,25	72,5	g	16,71	v
26,49	100,0	7,25	72,5	g	16,71	v
27,03[3]	60,0	7,25	72,5	ng	13,42	v
27,52	90,0	7,25	72,5	g	15,06	v

[1]: 'g' = geldig; 'ng' = niet geldig
[2]: minimum waterstanden IJsselmeer bij een frequentie van 1/10.000 per jaar (Rijkswaterstaat, 2004)
[3]: de pipinglengte van de voorhavendammen is bepaald aan de hand van recente dwarsprofielen verstrekt door Rijkswaterstaat (april 2005)
[4]: 'v' = voldoet; 'vn' = voldoet niet

F.2.2 Macrostabiliteit binnenwaarts

Voor de macrostabiliteit binnenwaarts wordt de opdrukveiligheid getoetst. De vergelijking voor de opdrukveiligheid luidt als volgt:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_w} \geq 1{,}2 \qquad \text{(TAW, 2001)} \qquad \text{(F.6)}$$

waarin:

σ_g = gronddruk aan de onderzijde van het afdekkend pakket van slecht doorlatende lagen [kN/m^2]

σ_w = opwaartse waterdruk onder het afdekkend pakket slecht doorlatende lagen [kN/m^2]

Tabel F.8 Resultaten eenvoudige toets macrostabiliteit binnenwaarts

dwarsprofiel (km)	buitenberm[1]	$\gamma_{opdruk;d>0}$ (-)	toets (d>0)[2]	toets (d=0)[2]
0,6	n	<1,2	o	v
1,2	n	<1,2	o	v
1,6	j	>1,2	o	o
1,93	j	>1,2	o	o
2,14	j	>1,2	o	o
2,85	j	>1,2	o	o
7,4	j	>1,2	v	v
12,55	j	>1,2	o	o
16,89	j	>1,2	o	o
20,51	j	>1,2	o	o
24,64	j	>1,2	o	o
26,05	j	>1,2	v	v
26,35	j	>1,2	o	o
26,49	j	>1,2	v	v
27,03	n	<1,2	o	v
27,52	j	>1,2	o	o
30,16	j	>1,2	o	o

[1]: 'n' = nee; 'j' = ja
[2]: 'o' = onvoldoende; 'v' = voldoende

Tabel F.9 Resultaten gedetailleerde toets macrostabiliteit binnenwaarts

bodem	SF_{min}[2] (-)	buitenberm	SF[1] (-)	score	buitenberm	SF[1] (-)	score
A	1,26	n	1,29	v	j	1,38	v
B	1,26	n	1,28	v	j	1,48	v
C	1,26	n	1,33	v	j	1,61	v
D	1,26	n	1,33	v	j	1,51	v
E	1,26	n	1,30	v	j	1,43	v
F	1,26	n	1,28	v	j	1,70	v
G	1,26	n	1,28	v	j	1,56	v
H	1,26	n	1,33	v	j	1,70	v

[1]: 'SF' = Safety Factor
[2]: 'SF_{min}' = ondergrens Safety factor

F.2.3 Macrostabiliteit buitenwaarts

Tabel F.10 Resultaten eenvoudige toets macrostabiliteit buitenwaarts

dwarsprofiel (km)	cotanα (-)	cotanα_{min} (-)	score
0,6	2,4	3,0	vn
1,2	2,7	3,0	vn
1,6	2,8	3,0	vn
1,93	3,0	3,0	v
2,14	3,6	3,0	v
2,85	3,7	3,0	v
7,4	2,8	3,0	vn
12,55	3,8	3,0	v
16,89	3,5	3,0	v
20,51	3,4	3,0	v
24,64	3,8	3,0	v
26,06	4,2	3,0	v
26,35	2,9	3,0	vn
26,61	2,5	3,0	vn
26,98	2,6	3,0	vn
27,64	3,0	3,0	v
30,16	3,0	3,0	v

Tabel F.11 Resultaten gedetailleerd toets macrostabiliteit buitenwaarts

bodem	SF_{min}[2] (-)	buitenberm	SF[1] (-)	score	buitenberm	SF[1] (-)	score
A	1,00	n	1,45	v	j	1,30	v
B	1,00	n	1,58	v	j	1,32	v
C	1,00	n	1,40	v	j	1,32	v
D	1,00	n	1,40	v	j	1,16	v
E	1,00	n	1,52	v	j	1,10	v
F	1,00	n	1,66	v	j	1,06	v
G	1,00	n	1,66	v	j	1,06	v
H	1,00	n	1,40	v	j	1,32	v

[1]: 'SF' = Safety Factor
[2]: 'SF_{min}' = ondergrens Safety factor

F.2.4 Microstabiliteit

Het oordeel voor de toetsing op microstabiliteit luidt als volgt (Rijkswaterstaat, 2005):
"Ten behoeve van de toets worden op de Afsluitdijk twee binnentaluds onderscheiden, het bovenste binnentalud van de kruin tot aan het fietspad en het onderste binnentalud van de snelwegberm tot aan de waterlijn van het IJsselmeer. Het bovenste binnentalud kent een grasbekleding, het onderste binnentalud is hoofdzakelijk bekleed met gezette steen.
Ter plaatse van de voorhavendammen is overigens slechts sprake van een enkel binnentalud, deels bekleed met gras en deels met gezette steen.
Voor het uitvoeren van de eenvoudige toets op microstabiliteit is een viertal voorwaarden opgesteld. De Afsluitdijk voldoet aan geen van deze voorwaarden.
Echter gezien de geometrie en opbouw van de dijk wordt opgemerkt dat het onwaarschijnlijk is dat onder maatgevende omstandigheden zich een dusdanig hoog freatisch vlak zal instellen dat de microstabiliteit van de dijk in gevaar komt. Aan de buitenzijde van de gehele Afsluitdijk is een kleibekleding aanwezig, de zandkern is volledig afgedekt door een zeer slecht waterdoorlatende keileemlaag. Zowel ter plaatse van de dijkdelen als ter plaatse van de voorhavendammen beschikt de dijk daarnaast over voldoende breedte om de eventuele waterspanningen in het dwarsprofiel in voldoende mate te reduceren. De resultaten van de in het kader van het toetsspoor macrostabiliteit

uitgevoerde MSeep (zie berekeningen in bijlage 5 (Rijkswaterstaat, 2005)) berekeningen bevestigen dit.
De veiligheid tegen het optreden van micro-instabiliteit als gevolg van freatisch water wordt hiermee voldoende beoordeeld.
De Afsluitdijk krijgt hiermee de score 'voldoende' voor het faalmechanisme micro-instabiliteit."

F.2.5 Stabiliteit bekleding

Bij de toetsing van de bekleding is onderscheid gemaakt in de toetsing van de steenbekleding van de primaire waterkering, de steenbekleding van de haven- en leidammen en de grasbekleding.

Steenbekleding primaire waterkering

Het toetsen van de steenbekleding wordt uitgevoerd met het computerprogramma Steentoets. Hierbij wordt de steenbekleding op zes faalmechanismen getoetst:

1. Toplaaginstabiliteit onder golfaanval;
2. Toplaaginstabiliteit onder langsstroming;
3. Afschuiving;
4. Materiaaltransport vanuit de ondergrond;
5. Materiaaltransport vanuit de granulaire laag.
6. Erosie van de onderlagen.

Deze faalmechanismen zullen hieronder nader worden toegelicht.

Toplaaginstabiliteit onder golfaanval

De belasting voor dit faalmechanisme bestaat uit de opwaartse druk op de toplaagelementen. De belasting wordt bepaald door de golfaanval en door enkele constructieve eigenschappen. De sterkte wordt bepaald door de toplaagdikte en de dichtheid van de toplaagelementen, de wrijving/klemming tussen de elementen en de taludhelling.
Uit de resultaten van het computerprogramma Steentoets blijkt dat in het algemeen de score voor toplaaginstabiliteit onder golfaanval ook de eindscore voor de steenbekleding is. De scores zijn 'goed', 'onvoldoende' en 'geavanceerd'.

Toplaaginstabiliteit onder langsstroming

De toetsing op dit faalmechanisme is geldig voor specifieke locaties waar sprake is van sterke stroming. Voor de Afsluitdijk is belasting door golfaanval echter maatgevend. Voor de steenbekleding van de primaire kering is dit spoor dan ook niet verder uitgewerkt.

Afschuiving

Bij dit faalmechanisme zijn voor de belasting de golfhoogte en de golfsteilheid van belang. Parameters voor de weerstand tegen afschuiving zijn de laagdikte, de relatieve dichtheid van de toplaag, de dikte van de filterlaag/de granulaire laag, de dikte van de cohesieve laag en de grofheid van het eventuele zand daaronder.
Uit de resultaten van het computerprogramma Steentoets blijken 26 vakken (totaal 276 vakken) de score 'geavanceerd' te krijgen. Deze score wordt bij 20 vakken veroorzaakt door een helling die steiler is dan 1:2,7, waardoor geavanceerd toetsen nodig is. De zes overige vakken blijken bij gedetailleerde toetsing de score 'twijfelachtig' te krijgen, waardoor alsnog geavanceerde toetsing noodzakelijk is.

Materiaaltransport vanuit de ondergrond

De belasting voor dit faalmechanisme wordt gevormd door een opwaartse kracht op de deeltjes door het verhang, welke wordt bepaald door de golfhoogte. De weerstand wordt bepaald door de verhouding tussen de korrelgrootte van de ondergrond en de grootte van de openingen in de laag daarboven.

Uit de resultaten van het computerprogramma Steentoets blijken bijna alle bekledingsvakken de score ‘goed’ te krijgen. Één bekledingsvak krijgt de score ‘onvoldoende’, wat komt doordat de natuursteen in dit vak direct op de kleilaag ligt.

Materiaaltransport vanuit de granulaire laag
De belasting voor dit faalmechanisme wordt gevormd door een opwaartse kracht op de deeltjes door het verhang, welke wordt bepaald door de golfhoogte. De weerstand wordt bepaald door de verhouding tussen de korrelgrootte van de granulaire laag en de grootte van de openingen tussen de toplaagelementen en de toplaagdikte.
Uit de resultaten van het computerprogramma Steentoets blijken alle bekledingsvakken de score ‘goed’ te krijgen.

Erosie van de onderlagen
Bij dit faalmechanisme is voor de belasting het tijdsverloop van waterstand en golfparameters tijdens een storm van belang. De weerstand tegen erosie wordt geleverd door de granulaire bekledingslaag en door de klei in het dijklichaam.
Uit de resultaten van het computerprogramma Steentoets blijken alle bekledingsvakken die in dit computerprogramma een eindscore ‘onvoldoende’ hebben, een score ‘geavanceerd’ krijgen na toetsing op erosie van de onderlagen. Gezien bovenstaande conclusie lijkt het niet zinvol om bekledingsvakken met een eindscore ‘geavanceerd’ in het computerprogramma Steentoets te toetsen op erosie van de onderlagen.

De eindscore van de toets op de steenbekleding van de primaire waterkering is in Tabel F.12 weergegeven.

Tabel F.12 Eindscore steenbekleding primaire waterkering

		totaal	goed	onvoldoende	geavanceerd
vakken	(st)	276	155	0	121
vakken	(%)	100	56	0	44%

Steenbekleding haven- en leidammen
De toetsing van de steenbekleding van haven- en leidammen zal voor dit onderzoek niet worden behandeld, aangezien het onderzoek zich richt op primaire waterkeringen.

Grasbekleding
De toetsing van de grasbekleding (op erosie door golfoverslag en afschuiving) is al meegenomen in de toetsing van de hoogte (zie paragraaf F.1).

F.2.6 Voorland
Gezien de geometrie van het voorland met een gemiddelde taludhelling van minder dan 1:50 tot 100 m uit de teen van de dijk, wordt geconcludeerd dat de stabiliteit van het voorland voldoende is.

F.2.7 Eindscore stabiliteit
De eindscore voor de stabiliteit kan worden beoordeeld als ‘voldoende’. In Tabel F.13 is de eindscore voor de stabiliteit in een overzicht weergegeven.

Tabel F.13 Eindscore stabiliteit

dwarsprofiel	piping en heave	macrostabiliteit		microstabiliteit	voorland	eindscore
(km)		binnenwaarts	buitenwaarts			
0,6	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
1,2	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
1,6	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
1,93	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
2,14	goed	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
2,85	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
7,4	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
12,55	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
16,89	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
20,51	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
24,64	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
26,05	goed	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
26,35	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
26,49	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
27,03	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
27,52	voldoende	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende
30,16	goed	goed	goed	voldoende	voldoende	voldoende

F.3 Niet-waterkerende objecten

De niet-waterkerende objecten betreffen de begroeiing, bebouwing, kabels en leidingen, en overige niet-waterkerende objecten (wegmeubilair, niet-waterkerende kunstwerken, et cetera) op en in de Afsluitdijk. De toetsing van niet-waterkerende objecten zal voor dit onderzoek niet worden behandeld, aangezien de toetsing hiervan niet van belang wordt geacht voor het onderzoek.

G Overzicht bekleding

De inhoud van deze appendix dient nog verder opgesteld en aangepast te worden!

Tabel G.1 Overzicht bekledingssystemen en dimensioneringsaandachtspunten (TAW, 1999)

toplaag	bezwijkmechanismen	maatgevende hydraulische belasting	sterkte
gras klei	• erosie • vervorming	• max. stroomsnelheid en -duur • golfklap	• cohesie • graswortels • kwaliteit gras/klei
losgestorte materialen	• begin van beweging • materiaaltransport • profielvervorming	• snelheidsveld stroom en/of golven • grondwaterstroming	• gewicht/diameter • wrijving • doorlatendheid • dynamische stabiliteit
verpakte bekledingen	• begin van beweging vulmateriaal • vervorming • aantasting/verwering draden en/of weefsel • randeffecten	• max. stroomsnelheid • golfklap • vandalisme	• gewicht/dikte • draden en/of weefsel • doorlatendheid incl. onderlagen
gezette bekledingen; blokkenmatten	• oplichten • vervorming • afschuiving • opsluitingen/ overgangen	• overdruk • golfklap	• dikte/gewicht • wrijving/inklemming • doorlatendheid incl. onderlagen en geotextiel • kabels/pennen
plaat-bekledingen	• oplichten • breuk • afschuiving • overgangen • veroudering	• overdruk • golfklap	• dikte/gewicht • mechanische sterkte
asfalt-bekledingen	• erosie • vervorming • opdrijven • afschuiving • veroudering	• overdruk • golfklap	• dikte/gewicht • mechanische sterkte • doorlatendheid
overige	• diverse	• diverse	• diverse

G.1 Toepassing toplaag en bijbehorende onderlaag

Hieronder zullen per type toplaag de locatie van toepassing in het dwarsprofiel en de bijbehorende onderlaag worden behandeld (TAW, 1999):

- Gras
  De locaties in het dwarsprofiel waar gras normaliter wordt toegepast zijn de golfoploopzone, de kruin, het binnenbeloop en de binnenberm. De onderlaag bestaat uit klei;
- Losgestorte materialen
  De locaties in het dwarsprofiel waar losgestorte materialen (breuksteen) worden toegepast bevinden zich zowel onder als boven water. De onderlaag bestaat uit een granulair filter en/of een geotextiel;
- Verpakte bekledingen
  De locaties in het dwarsprofiel waar verpakte bekledingen worden toegepast
  De onderlaag bestaat uit een geotextiel op zand of klei;
- Gezette bekledingen en blokkenmatten

De locaties in het dwarsprofiel waar gezette bekledingen kunnen worden toegepast dienen boven het niveau van laagwater te liggen. Blokkenmatten mogen wel onder het niveau van laagwater worden toegepast. De onderlaag bestaat uit een granulair filter en/of een geotextiel;

- Plaatbekledingen

  De onderlaag bestaat uit een granulair filter en/of een geotextiel;
- Asfaltbekledingen
  De locaties in het dwarsprofiel waar asfaltbekledingen kunnen worden toegepast
  De volgende onderlagen komen, apart of in combinatie, voor: loskorrelige materialen (zoals mijnsteen, grind en steenslag), klei, keileem, zandasfalt en geotextiel. Verder kan asfalt ook direct op het kernmateriaal zand worden aangelegd.

G.2 Keuze geokunststof of granulair filter

Hieronder is een fragment weergegeven over de keuze tussen de toepassing van een geokunststof en een granulair filter. (TAW, 2003)
"Zowel met een geokunststof als met granulaire lagen kan in principe voor elke situatie een goed werkend filter worden ontworpen. De keuze tussen de twee typen wordt dus niet rechtstreeks bepaald door de vereiste werking, maar door afgeleide criteria.

Een belangrijk verschil tussen de twee typen is de constructiedikte: een geokunststof heeft altijd een kleine dikte (orde mm), terwijl een granulair filter uit uitvoeringstechnisch oogpunt minimaal enkele cm dik moet zijn en bovendien nog dikker wordt als meer lagen nodig zijn, zie kader 5.3. De dikte van de filterconstructie is van belang voor de afweging: een dikker filter is moeilijker in te passen in de constructie en bovendien duurder.
Verder is een dikke granulaire laag in een steenzetting ongunstig met het oog op het faalmechanisme toplaaginstabiliteit, maar juist gunstig met het oog op afschuiving.

In bepaalde omstandigheden is uitvoeringstechniek van belang. Onder water is het niet mogelijk om een granulair filter met dunne lagen voldoende nauwkeurig aan te brengen. Anderzijds zijn voor het afzinken van een geokunststof speciale maatregelen nodig, die vooral bij kleine projecten relatief duur zijn.

Duurzaamheid geokunststoffen
Over de duurzaamheid van geokunststoffen is minder bekend dan over die van granulaire filters. De geokunststoffen in een steenzetting worden alleen tijdens de uitvoering blootgesteld aan het zonlicht; op basis van de beschikbare kennis wordt in de huidige ontwerppraktijk van steenzettingen aangenomen dat een levensduur van minimaal 50 jaar wordt gehaald.

In het algemeen geldt dat het goedkoper is om een geokunststof toe te passen dan een granulair filter.

G.3 Keuze soort geokunststof of granulair filter en dimensionering

G.3.1 Keuze soort geokunststof

Zoals besproken in 2.1.5 komen normaal gesproken twee soorten geokunststof in aanmerking voor ontwerp: vliezen (non-woven) en weefsels (woven). Beide soorten kunnen in het algemeen zo worden ontworpen dat wordt voldaan aan de eisen van gronddichtheid, waterdoorlatendheid en uitvoeringssterkte. De keuze wordt vaak bepaald door persoonlijke ervaring en voorkeur van de ontwerper, en de leverbaarheid van producten.

In het algemeen zijn vliezen minder gronddoorlatend, maar ook minder sterk dan weefsels. Bovendien rekken vliezen onder trekkracht meer dan weefsels; te veel rek is ongewenst omdat de doorlatendheid erdoor toeneemt. Dit verschil is relevant als in de uitvoering veel trekkracht wordt uitgeoefend op de geokunststof. In bijzondere gevallen kunnen ook folies in aanmerking komen, zie kader 5.6.

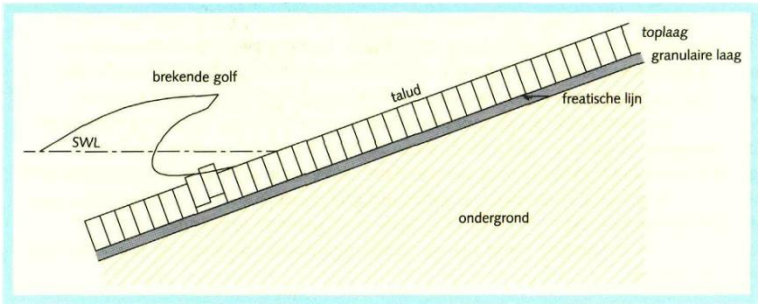
G.3.2 Toepassen Folies

Folies zijn waterdicht en daarom niet geschikt in zones waar wateroverdrukken kunnen ontstaan; ze kunnen dus in principe wel hoger op het talud worden toegepast, bijvoorbeeld meer dan 1 m boven gemiddeld hoogwater. Een ander nadeel is dat folies erg glad zijn; bij een relatief steile helling kan dit tot afschuiving leiden van de lagen erboven. Voor dit aspect bestaan geen algemeen toepasbare rekenregels; bij toepassing van een folie op een helling steiler dan ongeveer 1:4 is specialistische kennis nodig, zie ook 5.6.1."

G.4 Faalmechanismen steenbekleding

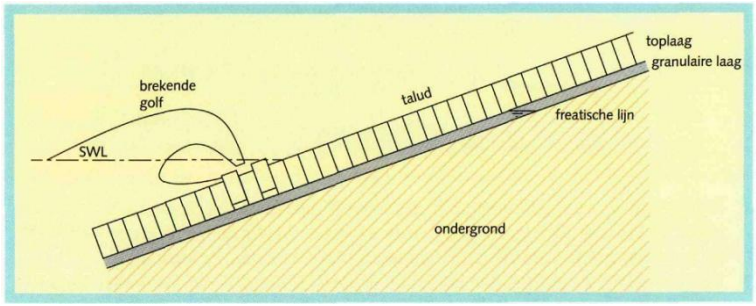
G.4.1 Falen steenzetting door toplaaginstabiliteit

Toplaaginstabiliteit bij maximale golfterugtrekking



Figuur G.1 Faalmechanisme toplaaginstabiliteit

Toplaaginstabiliteit door golfklap

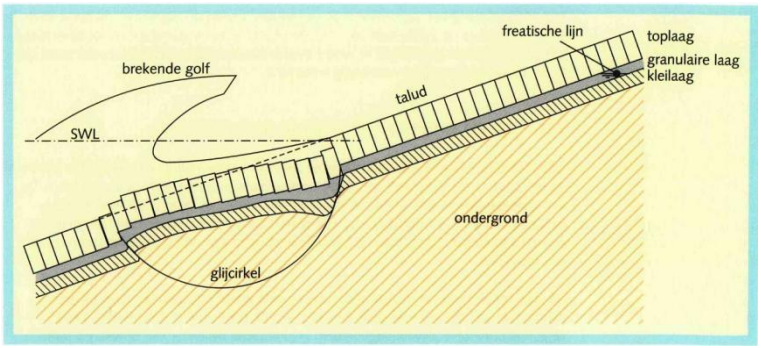


Figuur G.2 Faalmechanisme toplaaginstabiliteit door golfklap

Toplaaginstabiliteit door langsstroming

Toplaaginstabiliteit door golfoploop

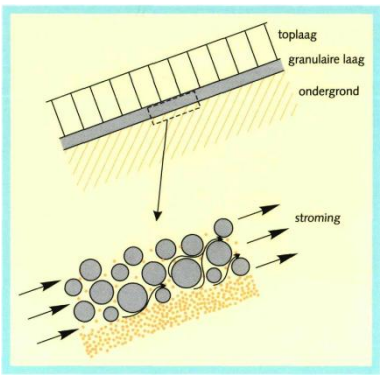
G.4.2 Falen steenzetting door afschuiving



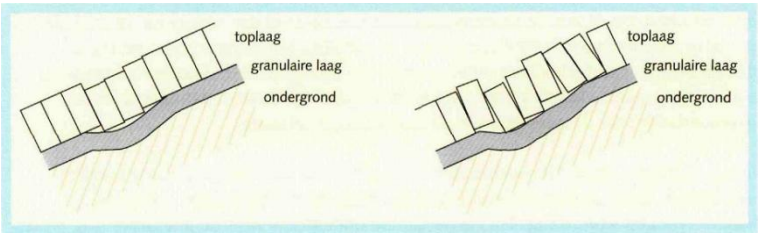
Figuur G.3 Diepe kleinschalige afschuiving

G.4.3 Falen steenzetting door materiaaltransport

Materiaaltransport vanuit ondergrond naar granulaire laag

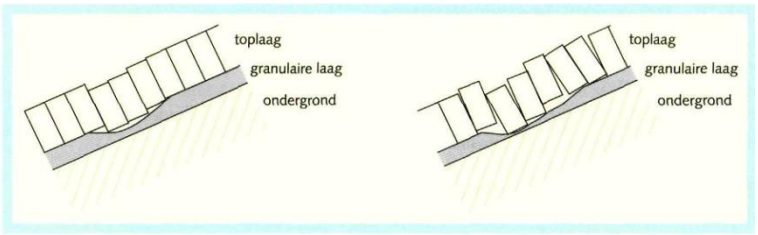


Figuur G.4 Uitspoeling van materiaal uit de onderlaag



Figuur G.5 Schadeverloop bij faalmechanisme materiaaltransport vanuit de ondergrond

Materiaaltransport vanuit de granulaire laag door de toplaag



Figuur G.6 Schadeverloop bij faalmechanisme materiaaltransport vanuit de granulaire laag

H Steenbekleding op kruin en binnentalud

H.1 Onderzoek steenbekleding op kruin en binnentalud

Hieronder is een fragment over de bekleding van de kruin en binnentalud met een steenzetting weergegeven. (TAW, 2003)

"Als de kruin van een dijk of dam minimaal de golfoploophoogte $z_{2\%}$ hoger ligt dan het ontwerppeil of toetspeil is de golfoverslag zodanig beperkt dat elke steenzetting volstaat. Bij een lagere kruin kunnen wel zware belastingen optreden. De ontwerp- en toetsregels zijn gebaseerd op recent onderzoek van WL|Delft Hydraulics [lit.23], waarbij gebruik is gemaakt van de resultaten van een modelonderzoek naar de stabiliteit van een met steenzettingen beklede kruin van de Afsluitdijk [lit.24]. Het recente onderzoek heeft nog niet geleid tot een uitgekristalliseerde, algemeen toepasbare rekenregel, maar heeft al wel mogelijk gemaakt dat de regels konden worden aangescherpt.
In het oude onderzoeksrapport [lit.24] staat geen algemene formule, maar staan wel de onderzoeksresultaten, zie Tabel H.1.

Tabel H.1 Onderzoeksresultaten steenzettingen op een kruin

proef	H_{m0} (m)	T_p (s)	ξ_{0} (-)	SWL+$z_{2\%}$ (m+NAP)	schade (-)	h_{kr}-SWL (m)	(SWL+$z_{2\%}$-h_{kr})/ΔD (-)
101	1,60	5,3	1,16	2,78	0	1,9	3,8
102	1,90	5,3	1,07	3,05	8 en 2	1,9	5,0
111	1,48	6,6	1,51	3,35	4	1,9	6,3
112	1,30	6,6	1,61	3,14	2	1,9	5,4
113	1,09	6,6	1,75	2,86	0	1,9	4,2
131	1,64	5,3	1,15	2,83	0	1,9	4,0
132	1,93	5,3	1,06	3,07	0	1,9	5,1
133	2,15	5,3	1,00	3,23	7	1,9	5,8
142	1,34	6,5	1,56	3,14	2	1,9	5,4

De parameter h_{kr} in de tabel staat voor de aanwezige kruinhoogte. De vermelde getallen in de kolom 'schade' geven aan hoeveel blokjes tijdens de proef uit de bekleding zijn gelicht. Verder geldt voor het onderzoek:

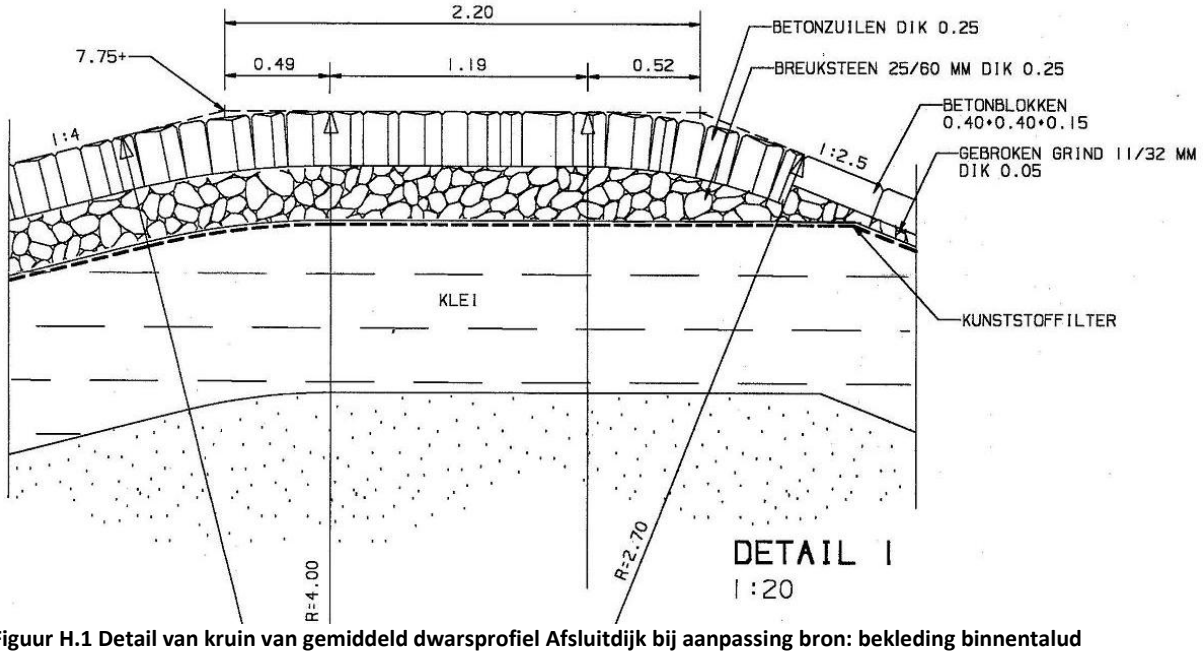
- relatieve dichtheid van de toplaagelementen: A = 1,15;
- dikte van de bekleding: D = 0,20 m (prototype);
- helling buitentalud: et = 1:4 a 1:5;
- helling binnentalud: 1:2,4;
- lengteschaal van het onderzoek: n_L = 10."

Verder zijn tijdens een brainstormsessie over de bekleding van het binnentalud van de Afsluitdijk op 24 augustus 1989 de volgende conclusies getrokken:

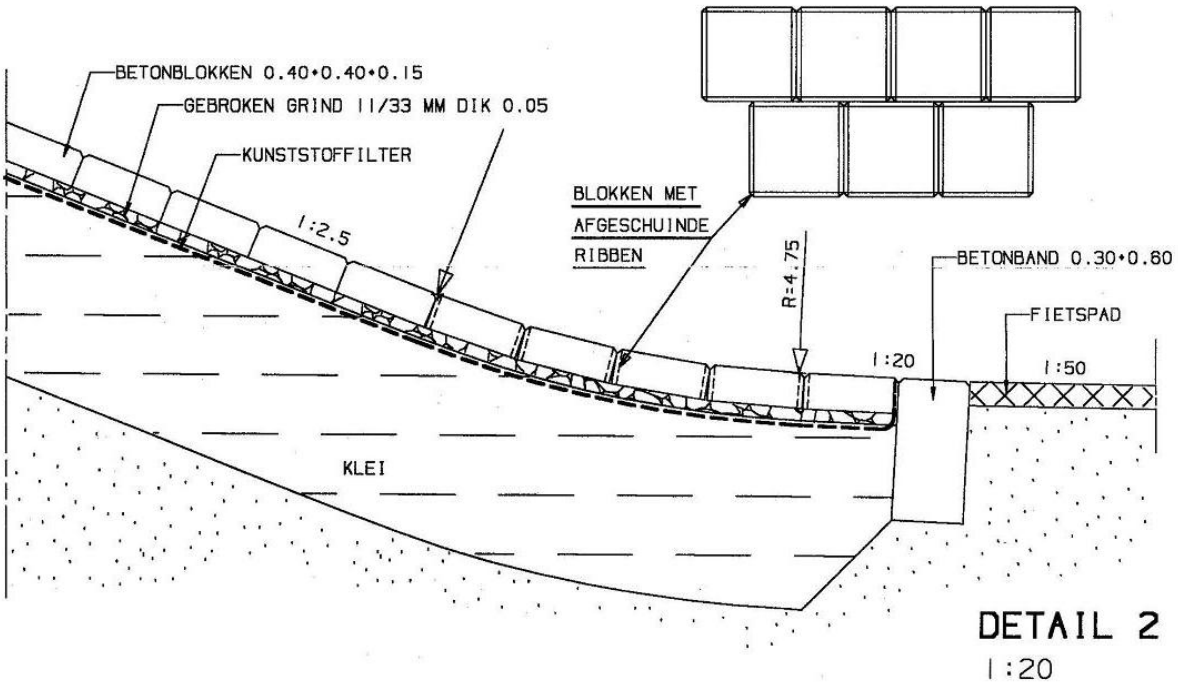
- In principe een volledige verstening van het binnentalud beschouwen. Letten op waterafvoer bij regen (i.v.m. begaanbaarheid);
- Veel aandacht schenken aan overgangsconstructies. Knikken zoveel mogelijk vermijden. Zo mogelijk afrondingen toepassen;
- De zetting op het binnentalud mag niet meer dan enige centimeters ruimte aan de kruin geven bij "nazakken" evenwijdig aan het talud;
- Overgangsblokken, indien ongelijkmatige overgangen, 1,5 keer zo zwaar uitvoeren;

- Binnentalud uitvoeren zonder filterconstructie op een vlijlaag van 5 à 10 cm op kleidicht geotextiel op waterdichte ondergrond.

In het rapport zijn ook Figuur H.1 en Figuur H.2 weergegeven.



Figuur H.1 Detail van kruin van gemiddeld dwarsprofiel Afsluitdijk bij aanpassing bron: bekleding binnentalud



Figuur H.2 Detail van teen van binnentalud van gemiddeld dwarsprofiel Afsluitdijk bij aanpassing bron: bekleding binnentalud

Verder is nog het volgende vermeld over het ontwerpen van een steenzetting op de kruin en het binnentalud (TAW, 2003):
"Deze paragraaf behandelt de steenbekleding van kruin en bijbehorend binnentalud van zee- en meerdijken die belast worden door golfoverslag. Bij de meeste dijken volstaat in deze zone een grasbekleding, maar in zeldzame gevallen; bij relatief lage dijken en hoge golven, kan het overslagdebiet zo groot zijn dat een harde bekleding nodig is.

Ontwerpprocedure kruin/binnentalud
Of een steenbekleding nodig is, hangt af van de toepasbaarheid en gewenstheid van een grasbekleding. Verwezen wordt naar kader 4.1 en naar [lit. 2]. De afweging en keuze tussen verschillende typen steenzettingen wordt gemaakt op basis van de criteria die ook voor het buitentalud boven ontwerppeil gelden (6.5), waarbij de concrete invulling anders kan zijn.

Dimensionering van de toplaag op kruin/binnentalud
De belasting van een steenzetting op de kruin of het binnentalud wordt bepaald door de golfoploop en door de kruinhoogtemarge (het verschil tussen stilwaterstand en kruinhoogte). De maatgevende situatie doet zich bijna altijd voor als de waterstand op ontwerppeil ligt. Als de kruin hoger ligt dan ontwerppeil+$z_{2\%}$ is de belasting door het overslagdebiet zo klein, dat een grasbekleding volstaat; als toch wordt gekozen voor een steenzetting, volstaat een standaard steenzetting met de minimaal leverbare afmetingen (bijvoorbeeld toplaagdikte van 0,20 m met een dichtheid van 2.300 kg/m^3). Als de kruin daarentegen lager ligt dan ontwerppeil+H_s is de belasting zo zwaar, dat de standaard rekenregel niet toepasbaar is (dit betreft normaal gesproken geen dijken maar bijvoorbeeld havendammen): in zo'n geval moet specialistische hulp worden ingeroepen. Situaties waarbij de kruin onder ontwerppeil ligt, worden behandeld in 6.7.
In tussenliggende gevallen, als de kruin tussen H_s en $z_{2\%}$ boven ontwerppeil ligt, volgt de benodigde toplaagdikte uit de volgende rekenregel:

$$\Delta D \geq \frac{1}{4}\left(\text{ontwerppeil} + z_{2\%} - h_{kr}\right) \qquad \text{(TAW, 2003)} \qquad \text{(H.1)}$$

waarin:

Δ	=	relatieve dichtheid toplaagelementen	[-]
D	=	dikte toplaag (= hoogte toplaagelementen)	[m]
$z_{2\%}$	=	golfoploopniveau	[m]
h_{kr}	=	kruinhoogte ter plaatse van de buitenkruinlijn op de peildatum	[m+NAP]

I Energieconversie

Energie is een hippe term tegenwoordig: overheid en bedrijven houden zich ermee bezig en het onderwerp gaat ook veel burgers aan. Er wordt gekeken hoe energie voor de mens in een nuttige vorm kan worden omgezet waarbij geen brandstoffen worden gebruikt of brandstoffen op een schone manier en op (korte) termijn worden geproduceerd. Verder wordt gezocht naar methoden waarbij weinig tot geen emissies zijn. Echter mogen de kosten ook weer niet te hoog zijn. De huidige olieprijs van ongeveer $ 110,- geeft veel mogelijkheden voor het zoeken naar schone(re) en duurzame alternatieven die kunnen concurreren met fossiele brandstoffen.
In Nederland wordt in allerlei kleine en grote projecten aandacht besteedt aan het winnen van energie uit verschillende bronnen. Verder wordt er gekeken naar het gebruik en hoe dit verminderd kan worden.

In dit hoofdstuk zullen de verschillende methoden voor het opwekken van elektriciteit worden beschouwd. Het doel van deze beschouwing is het verkrijgen van een overzicht waaruit valt op te maken hoe de verschillende methoden van elektriciteitsproductie zich tot elkaar verhouden en wat de mogelijkheden zijn in combinatie met de Afsluitdijk.

Door het schrijven van dit hoofdstuk wordt getracht om, voor zowel de lezer als de auteur van dit rapport, een duidelijk beeld over energie en de conversiesystemen voor elektriciteit te schetsen. Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende methoden van energieconversie zal eerst een introductie van het begrip energie worden gegeven. Een aantal foutief gebruikte termen worden besproken, het begrip duurzame energie wordt verhelderd en de ordegroottes van elektriciteitsverbruikers worden weergegeven.
Daarna zullen de verschillende methoden voor de productie van elektriciteit worden behandeld. Er zal worden gekeken naar de huidige en mogelijk toekomstige methoden voor de productie van elektriciteit. Per methode zullen onder andere het principe, enkele kengetallen, de toepasbaarheid voor de Afsluitdijk en de voor- en nadelen worden behandeld.

Onderzoek doen naar energie is een complexe opgave, waarbij veel ervaring (in diverse vakgebieden) en specialisme benodigd is. Het beoogde doel van deze appendix van dit rapport is dan ook alleen het op een eenvoudige, maar doeltreffende manier beschouwen en vergelijken van de verschillende mogelijkheden voor toepassing van duurzame elektriciteitsopwekking voor de Afsluitdijk.

I.1 Introductie Energie

Voordat er een vergelijking gemaakt wordt tussen de verschillende mogelijkheden van energieconversie toepasbaar voor de Afsluitdijk zal er teruggegrepen worden naar de basis: het begrip 'energie'.

I.1.1 Algemeen

Een algemene omschrijving van het begrip 'energie' is: het niet-stoffelijke vermogen tot het aanbrengen van veranderingen aan en in stoffelijke lichamen (Energieconversie, 2005). In natuurkundige zin is energie de totale hoeveelheid energie die moet worden verricht om vanaf een grondtoestand tot de huidige situatie te komen. De totale energie van een systeem is de som van alle bijdragen die op verschillende manieren is opgeslagen. Volgens de eerste hoofdwet van de thermodynamica (de wet van behoud van energie) kan energie niet uit het niets ontstaan en evenmin verloren gaan. Dit betekent dat er alleen omzetting van energie kan plaatsvinden. Er zijn verschillende soorten energie, zo is er thermische, mechanische, kinetische, potentiële, elektrische, magnetische, chemische en nucleaire energie. De tweede hoofdwet van de thermodynamica houdt echter een beperking in voor het omzetten van energie. Elke omzetting houdt een toename in van de entropie. Dit wil zeggen dat elke energieomzetting gepaard gaat met een vermindering van de voor verdere praktische toepassing beschikbare energie (de zogenaamde exergie) en een toename van wanorde dat een belasting betekent voor het milieu. De vermindering van exergie wordt in de praktijk aangeduid als 'energieverlies', maar is dus in feite een exergieverlies.
Het conversierendement geeft aan welk gedeelte van de toegevoerde energie na conversie in een andere vorm beschikbaar blijft voor praktische toepassing. 'Energiegebruik' (in dagelijks taalgebruik ten onrechte wel 'energieverbruik' genoemd) betekent in niet-wetenschappelijk spraakgebruik de conversie van de ene vorm van energie in een andere met verlies voor de verdere praktische toepasbaarheid (bijvoorbeeld de verbranding van aardgas tot kooldioxide en water). Verhoging van het conversierendement leidt tot vermindering van het energieverlies, wat soms wordt gezien als een vorm van energiebesparing. Een engere maar zuiverdere definitie van energiebesparing heeft alleen betrekking op het verminderen van de vraag, dat wil zeggen het vermijden of verminderen van energiegebruik, met uitsluiting van verbetering van het conversierendement.(Energieconversie, 2005)

I.1.2 Dimensie

De eenheid in het Système International (SI-stelsel) voor energie (E) is joule (J), waarbij geldt dat: $J = N \cdot m = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = W \cdot s$.

Een term die vaak verward wordt met energie is 'vermogen'. Echter is vermogen energie per tijdseenheid (vermogen [P] in Watt [W]). Het vermogen van een stofzuiger is bijvoorbeeld 1.400 W, terwijl deze, voor een half uur stofzuigen een hoeveelheid energie van 700 Wu gebruikt.
Een ander geval van verwarring is het 'produceren van energie'. Energie kan alleen worden omgezet van de ene vorm in een andere vorm, bijvoorbeeld het omzetten van kinetische energie in elektrische energie. De term 'elektriciteitsproductie' mag wel gebruikt worden.

I.1.3 Energiebronnen

Er zijn vele energiebronnen welke zijn te herleiden tot twee hoofdbronnen (Energieconversie, 2005):

1. Kernkracht: natuurlijke kernfusie in de zon, kunstmatige kernfusie, kernsplijting en het natuurlijk verval op aarde.
2. Gravitatiekrachten: zwaartekrachten van aarde, maan en zon.

Bronnen voor conversie naar elektriciteit die hieruit voortkomen zijn:

- Fossiele brandstoffen
- Biomassa
- Kernenergie
- Waterkracht
- Getijden
- Golfslag
- Zoutgradiënt
- Temperatuurgradiënt
- Magnetohydrodynamica
- Zonnestraling
- Wind
- Aardwarmte

Een overzicht van de bronnen en conversies is in appendix I-A in tabelvorm weergegeven.

I.1.4 Duurzame, groene, hernieuwbare en alternatieve energie

Duurzame, groene, hernieuwbare en alternatieve energie zijn allemaal termen die slaan op methoden voor het omzetten van energie. Allereerst zal er gekeken worden naar duurzame energie aangezien een aantal van de andere termen verwijzen naar of vergeleken worden met duurzame energie.

I.1.4.1 Duurzame energie

Een tegenwoordig veelgebruikte term is ‘duurzame energie’, maar wat houdt deze term eigenlijk precies in en voor welke soorten energie(conversie) is het gerechtvaardigd deze term te gebruiken? Er zijn verschillende definities van ‘duurzame energie’. Er zal niet geprobeerd worden een exacte definitie van het begrip ‘duurzame energie’ te formuleren, maar er zal wel getracht worden een (voor dit rapport) bruikbare definitie van het begrip ‘duurzame energie’ te geven. Allereerst zal van verschillende bronnen de definitie voor ‘duurzaam’ en ‘duurzame energie’ worden gegeven:

1. Brundtland-rapport *Our Common Future* opgesteld onder leiding van de Noorse ex-premier dr. Gro Harlem Brundtland:
   “Sustainable development is not a fixed state of harmony, but rather a process of change in which the exploitation of resources, the direction of investments, the orientation of technological development, and institutional change are made consistent with future as well as present needs.” ((WCED), 1987)
   “Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” ((WCED), 1987)
2. Ministerie van Economische Zaken *Energie Onderzoek strategie* (Zaken, 2001):
   “Duurzame energie staat in het Nederlandse beleid voor elektriciteit, warmte of brandstof uit ‘hernieuwbare bronnen’. Dit zijn bronnen die onuitputtelijk zijn (bijvoorbeeld wind) of relatief snel vervangbaar (bijvoorbeeld biomassa), in tegenstelling tot fossiele brandstoffen als olie of gas.”
3. Wikipedia:
   “Sustainability is a characteristic of a process or state that can be maintained at a certain level indefinitely. The term, in its environmental usage, refers to the potential longevity of vital human ecological support systems, such as the planet's climatic system, systems of agriculture, industry, forestry, and fisheries, and human communities in general and the various systems on which they depend.”
   “Sustainable energy sources are energy sources which are not expected to be depleted in a timeframe relevant to the human race, and which therefore contribute to the sustainability of all species.”

4. Woordenboek Van Dale *Handwoordenboek der Nederlandse taal* (Dale, 1991):
   "Duurzaam: weinig vergankelijk."
5. SenterNovem-rapport *Protocol Monitoring Duurzame Energie Update 2006* (Bosselaar, et al., 2006):
   "Het probleem met energieproductie is dat veel van de bronnen waaruit energie wordt gewonnen op kunnen raken, en dat er bij het produceren ervan vervuilende stoffen (vooral CO_2 en verzurende componenten) vrijkomen. Sinds jaren wordt dus gezocht naar energiebronnen waarvoor dit niet geldt. In dit protocol wordt duurzaam gebruikt als synoniem voor hernieuwbaar, oftewel voor energie opgewekt uit bronnen die niet op kunnen raken. In sommige literatuur wordt voor duurzame energie een beperktere definitie gehanteerd, namelijk energie uit bronnen die niet op kunnen raken én niet vervuilen. Daarbij wordt duurzaam dus niet gebruikt als synoniem voor hernieuwbaar (renewable) maar voor sustainable, wat betekent dat de bronnen niet alleen hernieuwbaar zijn, maar ook minder belastend zijn, dan conventionele energiebronnen wat betreft klimaatverandering, verzuring, vermesting, verspreiding, verwijdering, verstoring, verdroging en verspilling (EnergieNed [1997]). Om praktische redenen kan voor dit protocol niet van een dergelijke definitie worden uitgegaan. Het vergelijken van de levenscyclusanalyses van duurzame en conventionele technieken zou het doel van het protocol voorbijschieten. In het kader van dit protocol geldt daarom: duurzaam = hernieuwbaar. Duurzame energie volgens de hier gehanteerde definitie voldoet dus niet altijd aan de vereisten van duurzame ontwikkeling, een begrip waarvoor wél een beperkte definitie van duurzaam wordt gebruikt. Deze keuze is ook in lijn met internationaal gangbare definities (IEA, Eurostat). Hoewel dit protocol zich vooral richt op hernieuwbare energie, wordt het belang van het voorkomen van vervuiling niet uit het oog verloren."

De laatste definitie (5) voor het begrip 'duurzame energie' zal in dit rapport gehanteerd worden als criterium en wel om de volgende reden: in deze definitie staat dat een levenscyclusanalyse van duurzame en conventionele technieken het doel van het protocol voorbij zou schieten. Dit is ook het geval voor dit rapport, aangezien er wordt getracht een zo schoon mogelijke energiebron voor toepassing voor de Afsluitdijk te vinden.

I.1.4.2 Groene energie

Volgens CertiQ (een door het Ministerie van Economische Zaken aangewezen organisatie die bedrijven certificeert voor 'groen opgewekte elektriciteit) geldt voor 'groene energie' de volgende definitie: "Groene energie is de verzamelnaam voor energie opgewekt uit duurzame bronnen." (Certiq, 2008)
Hierbij hanteert CertiQ als definitie voor 'duurzame elektriciteit': "Duurzaam wil zeggen dat de energiebron onuitputtelijk is, dat de energie schoon en betrouwbaar is en dat er bij winning en omzetting nauwelijks schadelijke effecten voor het klimaat zijn. Zon, wind, waterkracht en biomassa zijn voorbeelden van duurzame energiebronnen." (Certiq, 2008)

I.1.4.3 Hernieuwbare energie

Bij hernieuwbare energie is de achterliggende gedachte dat er evenveel energie opgewekt als gebruikt wordt. De bronnen zijn daarbij vaak niet duurzaam aangezien deze vaak vervuiling veroorzaken.
In het publicatieblad van de Europese Gemeenschappen staat in *Richtlijn 2001/77/EG van het Europees parlement en de raad* (Gemeenschappen, 2001): "'Hernieuwbare energiebronnen': hernieuwbare, niet-fossiele energiebronnen (wind, zonne-energie, aardwarmte, golfenergie, getijdenenergie, waterkracht, biomassa, stortgas, rioolwaterzuiveringsgas en biogas)."
In het *Protocol Monitoring Duurzame energie* (Novem, 1999) van Novem worden 'hernieuwbare energiebronnen' als volgt gedefinieerd: "Hernieuwbare energiebronnen zijn energiebronnen waarbij hernieuwbare energiedragers met behulp van energieconversietechnologieën kunnen worden omgezet in de secundaire energiedragers elektriciteit, warmte en/of brandstof."

I.1.4.4 Alternatieve energie

'Alternatieve energie' wordt door assistent professor M.J. Traum (Department of Mechanical and Energy Engineering at the University of North Texas) als volgt gedefinieerd: ""Alternative" refers to any non-fossil-fuel energy source, but it does not necessarily have to be renewable." (Traum, 2007)

I.1.5 Elektriciteit

Tot nu toe is alleen maar gesproken over de conversie van energie. Er zal nu gekeken worden naar een vorm van energie die voor de mens een zeer nuttige vorm is, namelijk: elektriciteit.
In dit rapport zal alleen maar gekeken worden naar de opwekking van elektriciteit, aangezien andere eindproducten (bijvoorbeeld warmte) minder kansrijk en/of interessant voor toepassing in combinatie met de Afsluitdijk zijn.

Algemeen
"Elektriciteit is een vorm van energie. Het wordt geproduceerd door beweging of stroming van elektronen. Elektronen zijn nietige, minuscule deeltjes in atomen. De beweging van de elektronen veroorzaakt een elektrische lading c.q. spanning die energie afgeeft." (InfoNu)
Woordenboek Van Dale *Handwoordenboek der Nederlandse taal* geeft als definitie voor 'elektriciteit' (Dale, 1991):
"Elektriciteit:
1. Energie, opgewekt door wrijving, warmte, scheikundige werking of magnetische inductie.
2. Elektra: aansluiting op het elektrisch net.
3. Verbruik van elektrische energie."

Elektriciteitsproductie
Elektriciteit is afkomstig van verschillende bronnen (zoals eerder besproken), welke veelal worden beheerd door energiebedrijven. De opwekking van elektriciteit gebeurt grotendeels in Nederland (bruto elektriciteitsproductie 2006: 98.586 GWh), echter wordt er ook elektriciteit geïmporteerd vanuit het buitenland. In 2006 werd er in totaal 21.553 GWh aan elektriciteit geïmporteerd (vanuit Duitsland en België). (CBS)

Het binnenlands elektriciteitsgebruik is in Tabel I.1 berekend.

Tabel I.1 Berekening binnenlands gebruik (CBS)

element	energie (GWu)	
bruto elektriciteitsproductie	98.586	
eigen gebruik elektriciteitsproducten	3.902	-
totaal netto productie	**94.684**	
invoersaldo	21.553	+
beschikbaar voor binnenlands gebruik	**116.237**	
netverliezen	4.533	-
binnenlands gebruik	**111.704**	

I.1.6 Verbruikers

Na het voorgaande zal ook de bestemming van de geproduceerde elektriciteit bekeken worden. Dit om een idee te krijgen van de orde van grootte van het vermogen van de verbruikers (verbruikende apparaten) in relatie tot het vermogen van de productie-eenheden. De vermogens en de hoeveelheid daarbij gebruikte energie zijn in Tabel I.2 te zien.

Tabel I.2 Verbruikers

apparaat	vermogen (W)	tijd (u)	energie-gebruik (Wu)
discman	2,25	1	2,25
draagbare stereo	13	1	13
gloeilamp	60	4	240
televisie	65	4	260
kantoorcomputer	200	8	1.600
koffiezetapparaat	750	0,25	188
strijkijzer	1.000	0,5	500
elektrische kookplaat	1.500	0,5	750
auto	75.000	1	75.000
trein (locomotief)	4.540.000	2	9.080.000
hogesnelheidslijn	8.800.000	2	17.600.000
vliegtuig (Boeing 747)	213.150.000	9	1.918.350.000

Tot slot nog enkele kengetallen:

- De elektriciteitsprijs voor consumenten bedraagt: € 0,208/kWh - € 0,225/kWh.(CBS)
- Het gemiddeld elektriciteitsgebruik per huishouden in 2006 bedroeg: 3.402 kWh.(EnergieNed)

I.2 Toelichting aspecten voor vergelijking

In de volgende paragrafen zullen de verschillende methoden voor (grootschalige) productie van elektriciteit op systematische wijze worden besproken. Niet alleen methoden met duurzame energiebronnen zullen aan de orde komen, ook methoden met toepassing van bijvoorbeeld fossiele brandstoffen als energiebron worden besproken. De niet-duurzame methoden zijn echter alleen toegevoegd om een compleet overzicht te verkrijgen. De kanshebbende methoden voor de Afsluitdijk zijn alleen de duurzame methoden. Per methode zullen de volgende aspecten worden behandeld:

D. Methode: Het principe van de methode zal worden besproken.
E. Algemene gegevens: Enkele kengetallen van de methoden worden hier weergegeven. Te denken valt aan het elektrisch vermogen, de opbrengst, het elektrisch conversierendement, levensduur, et cetera.
F. Toekomst: Eventueel toekomstige plannen en nieuwe technologieën zullen aan de orde komen. Verder zal aangegeven worden wat het potentieel voor Nederland is.
G. Toepassing Afsluitdijk: Er zal voor de methode worden aangegeven of deze wel of niet geschikt is voor toepassing bij de Afsluitdijk en wat het potentieel bij toepassing bij de Afsluitdijk bedraagt. Als de methode niet geschikt blijkt te zijn voor toepassing voor de Afsluitdijk zal er geen aandacht meer aan de methode worden geschonken.
H. Voor- en nadelen: De voordelen (aangegeven met ‘+‘) en nadelen (aangegeven met ‘-‘) van de methode voor verschillende aspecten worden behandeld.

Nadat alle methoden zijn besproken zal een overzicht worden gegeven waarna er een conclusie getrokken zal worden.

I.3 Energie uit brandstoffen

Onder de categorie energie uit brandstoffen vallen de methoden waar 'grondstoffen' bij benodigd zijn om elektriciteit op te kunnen wekken. De brandstoffen die als energiebron gebruikt worden zijn: fossiele brandstoffen en biomassa.

Fossiele brandstoffen zijn koolstofverbindingen die zijn ontstaan als resten van plantaardig en dierlijk leven uit het geologische verleden van de aarde. Tot de fossiele brandstoffen behoren aardolie, aardgas, steenkool en bruinkool. Ook turf gewonnen uit hoogveen en laagveen behoren tot fossiele brandstoffen, echter hebben deze producten nog niet blootgestaan aan de extremen van druk en temperatuur in het binnenste van de aarde die tot de vorming van kolen, olie en gas hebben geleid.
Energie uit fossiele brandstoffen is indirect een vorm van zonne-energie (kernfusie in de zon; vanaf hier zal met 'zonne-energie' ook kernfusie in de zon als bron bedoeld worden), welke is opgeslagen in plantaardige en dierlijke koolstofverbindingen (door fotosynthese).
De voorraad fossiele brandstoffen is niet onuitputtelijk, het gebruik van deze energiebron is vele malen groter dan de snelheid waarmee door fotosynthese nieuwe organische stoffen worden aangemaakt.
Om deze brandstoffen in voor de mens nuttige energie om te zetten worden deze verbrand, waarbij onder andere CO_2 vrijkomt.

Biomassa is de hoeveelheid levend en recent afgestorven biologisch materiaal die gebruikt wordt als brandstof voor industriële productieprocessen. Meestal is biomassa plantaardig materiaal dat gekweekt is voor gebruik als biobrandstof, maar onder biomassa valt ook dierlijk materiaal gebruikt voor het produceren van vezels, chemicaliën of warmte. Biomassa kan ook biologisch afbreekbaar afval betreffen, wat gebruikt kan worden als brandstof voor de opwekking van elektriciteit, al dan niet in combinatie met warmte. Voorbeelden van biomassa zijn houtsnippers, papier en gft-afval.
Energie uit biomassa is evenals energie uit fossiele brandstoffen indirect een vorm van zonne-energie, welke is opgeslagen in plantaardig en dierlijk materiaal (door fotosynthese).
Het conversieproces van energie uit biomassa gebeurt op dezelfde manier als bij het halen van energie uit fossiele brandstoffen. Het verschil ligt in de achterliggende gedachte dat het halen van energie uit biomassa een CO_2-neutraal proces is (mits er voldoende gecompenseerd wordt natuurlijk): bij verbranding van biomassa komt CO_2 vrij, welke recentelijk door de planten die worden verbrand aan de atmosfeer is onttrokken. Echter blijkt dit proces in de praktijk vaak niet neutraal te zijn. De voorraad biomassa kan bij tijdige en voldoende aanplant als onuitputtelijk worden beschouwd.

De methoden die besproken zullen worden zijn: gas- en kolengestookte elektriciteitsproductie (inclusief biomassa). De reden dat in dit rapport biomassa en kolen onder één noemer vallen is dat biomassa over het algemeen vaak wordt meegestookt in kolencentrales.

Opmerking:
Bij een aantal centrales worden elektriciteit en warmte voor gebruik geproduceerd, echter zal hier alleen gekeken worden naar de productie van elektriciteit.

I.3.1 Gas

A. Methode
Gasgestookte elektriciteitsproductie vindt plaats door het aanvoeren van water onder hoge druk, dat vervolgens verhit wordt door verbranding van gas. Het gevolg is een transformatie van water in verzadigde stoom. De verzadigde stoom drijft een turbine aan welke is gekoppeld aan een generator welke bewegingsenergie omzet in elektrische energie.

B. *Algemene gegevens*
In Nederland zijn op dit moment 43 gasgestookte elektriciteitscentrales (sommige in combinatie met stadsverwarming) te vinden. De ordegrootte van de gasgestookte centrales in Nederland ligt tussen 18 en 820 MW. Het totale vermogen aan gasgestookte centrales in Nederland bedraagt circa 10.729 MW. Deze centrales leverden in 2006 circa 57.043 GWh aan elektriciteit, wat neerkomt op een aandeel van 57,86% van de Nederlandse elektriciteitsproductie. Het elektrisch rendement ligt, afhankelijk van het type gascentrale tussen 46% en 55%.(Menkveld, 2004)(Seebregts, et al., 2005)
Zie appendix I-B voor een overzicht van de huidige gasgestookte elektriciteitscentrales in Nederland.

C. *Toekomst*
Er zijn (voorlopig) plannen om in de toekomst tien gasgestookte elektriciteitscentrales (sommige in combinatie met stadsverwarming) bij te bouwen.
Zie appendix I-C voor een overzicht van de geplande gasgestookte elektriciteitscentrales in Nederland.

D. Toepassing Afsluitdijk
Gasgestookte elektriciteitsproductie is geen duurzame methode van energieconversie vanwege het gebruik van fossiele brandstoffen en de uitstoot van onder andere CO_2. Deze methode dient dan ook alleen ter vergelijking en zal verder niet meer worden behandeld.

I.3.2 Kolen (inclusief biomassa)

A. Methode
Kolengestookte elektriciteitsproductie (inclusief biomassa) vindt plaats door het aanvoeren van water onder hoge druk, dat vervolgens verhit wordt door verbranding van zeer fijn vermalen kool. Het gevolg is een overgang van water in verzadigde stoom. De verzadigde stoom drijft een turbine aan welke is gekoppeld aan een generator welke bewegingsenergie omzet in elektrische energie.

B. *Algemene gegevens*
In Nederland zijn op dit moment acht kolengestookte elektriciteitscentrales (sommige in combinatie met stadsverwarming) te vinden. De ordegrootte van de kolengestookte centrales in Nederland ligt tussen 253 en 645 MW. Het totale vermogen aan kolengestookte centrales in Nederland bedraagt circa 4.176 MW. Deze centrales leverden in 2006 circa 27.841 GWh aan elektriciteit (waarvan 4.715 GWh afkomstig van biomassa), wat neerkomt op een aandeel van 23,46% van de Nederlandse elektriciteitsproductie (waarin 4,78% afkomstig van biomassa). Het elektrisch rendement ligt, afhankelijk van het type kolencentrale, tussen 36% en 44%. (Menkveld, 2004) (Seebregts, et al., 2005)
Zie appendix I-B voor een overzicht van de huidige kolengestookte elektriciteitscentrales in Nederland.

C. *Toekomst*
Er zijn (voorlopig) plannen om in de toekomst zes kolengestookte elektriciteitscentrales bij te bouwen.
Zie appendix I-C voor een overzicht van de geplande kolengestookte elektriciteitscentrales in Nederland.

D. Toepassing Afsluitdijk
Kolengestookte elektriciteitsproductie (inclusief biomassa) is geen duurzame methode van elektriciteitsproductie vanwege het gebruik van fossiele brandstoffen en de uitstoot van onder andere CO_2. Het gebruik van biomassa als brandstof kan overigens wel duurzaam zijn, maar is geen optie voor toepassing op de Afsluitdijk aangezien dit een kostbare optie is en omdat de locatie ‘de

Afsluitdijk' geen geschikte locatie is. Deze methode dient dan ook alleen ter vergelijking en zal verder niet meer worden behandeld.

I.4 Kernenergie

Kernenergie komt voort uit kernreacties, reacties waarbij atoomkernen zijn betrokken. Bij kernenergie wordt uranium (kernsplijting) of waterstof (kernfusie) gebruikt als grondstof, welke uit natuurlijke bronnen wordt gehaald. De voorraad uranium is, evenals fossiele brandstoffen niet oneindig. Waterstof is in de aardse atmosfeer nauwelijks aanwezig, maar kan wel op verschillende manieren geproduceerd worden. Echter komt er bij het produceren van waterstof CO_2 vrij. (Menkveld, 2004)
Om van kernenergie een voor de mens nuttige vorm van energie te maken laat men, in het geval van kernsplijting, atoomkernen op elkaar botsen waarbij energie vrijkomt. De gevolgen van dit proces zijn radioactieve restproducten.
In het geval van kernfusie smelten atoomkernen samen waarbij massa wordt omgezet in energie. Bij dit proces worden niet noodzakelijkerwijs radioactieve restproducten gevormd.

A. Methode
Elektriciteitsproductie uit kernenergie geschiedt door kernsplijting of (voorlopig alleen experimenteel) door kernfusie in één of meer kernreactors.
In het geval van kernsplijting komt bij het splijten van de 'brandstof' uranium een grote hoeveelheid warmte vrij, waarmee water verhit wordt tot stoom. De stoom drijft een turbine aan welke is gekoppeld aan een generator welke beweging omzet in elektrische energie.
In het geval van kernfusie versmelten twee lichte atoomkernen tot één zwaardere. Hierbij wordt massa omgezet in energie. De technologie kernfusie bevindt zich nog in de onderzoeksfase.

B. *Algemene gegevens*
In Nederland zijn op dit moment zes kerncentrales te vinden, waarvan er één elektriciteit levert aan het elektriciteitsnet. De overige centrales zijn buiten bedrijf, in de functie van onderzoekscentrum, of er worden handelingen verricht met radioactief materiaal. De ordegrootte van de aan het net elektriciteit leverende kerncentrale bedraagt 485 MW (EPZ). Deze centrale leverde in 2006 circa 3.469 GWh aan elektriciteit, wat neerkomt op een aandeel van 3,52% van de Nederlandse elektriciteitsproductie. (CBS) Het elektrisch rendement bedraagt ongeveer 33%.
Zie appendix I-B voor een overzicht van de huidige kernenergiecentrale in Nederland.

C. *Toekomst*
Er zijn geen aanwijzingen waaruit blijkt dat er een reële kans is op de bouw van een nieuw kerncentrale in Nederland.

D. Toepassing Afsluitdijk
Elektriciteitsproductie uit kernenergie is (nog) geen duurzame methode van elektriciteitsproductie vanwege het gebruik van, weliswaar in kleine hoeveelheden, de 'brandstof' uranium, waarvan de voorraad niet onbeperkt is. (Kloosterman, 2007) Deze methode dient dan ook alleen ter vergelijking en zal verder niet meer worden behandeld.

I.5 Energie uit water

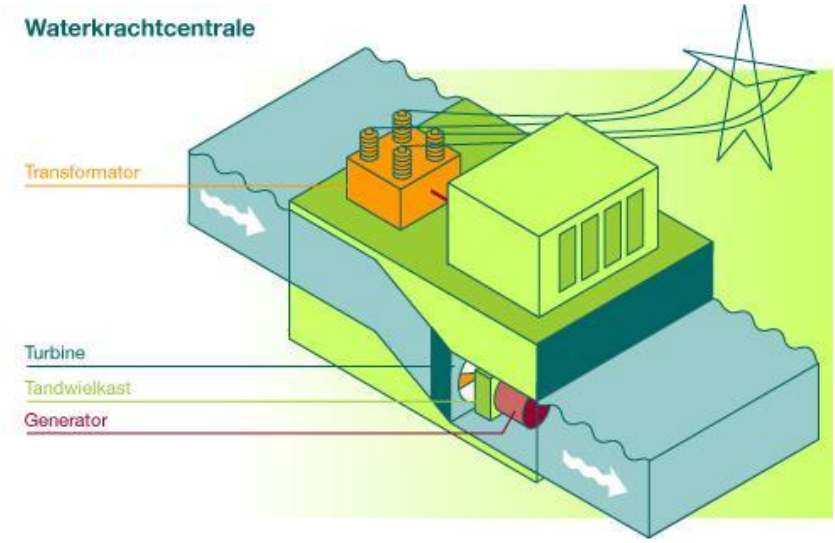
Er zijn verschillende methoden om elektriciteit uit water op te wekken, hierbij wordt veelal gebruik gemaakt van hoogteverschillen of de stroomsnelheid van water. Ook relatief nieuwe methoden gebaseerd op het verschil in zoutconcentratie tussen zeewater en zoet water leveren elektriciteit.

I.5.1 Waterkracht

Waterkracht is het arbeidsvermogen dat door stromend of vallend water wordt ontwikkeld. (van Duivendijk, 2004)
Energie uit waterkracht is een indirecte vorm van zonne-energie: het water verdampt door zonnewarmte, wordt door wind (ook een gevolg van temperatuurverschillen) omhoog getransporteerd en valt als regen weer op een berg of hoogte waardoor potentiële zwaartekrachtenergie is verkregen. Deze vorm van energie kan voor de mens nuttig worden gemaakt door het water naar een lager niveau te laten vallen of stromen.

A. Methode

Een waterkrachtcentrale wekt elektriciteit op door stromend of neerstortend water te gebruiken om turbines aan te drijven die gekoppeld zijn aan een generator welke beweging omzet in elektrische energie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen waterkrachtcentrales in veelal bergachtige gebieden (bijvoorbeeld een stuwmeer) welke meer afhankelijk zijn van hoogteverschillen in water en waterkrachtcentrales in minder reliëfrijke gebieden (bijvoorbeeld een riviercentrale) welke meer afhankelijk zijn van de stroomsnelheid van water. (van Duivendijk, 2004)



Figuur I.1 Waterkrachtcentrale (Centraal)

B. *Algemene gegevens*

In Nederland zijn op dit moment vier ‘grote’ (mondiaal gezien relatief klein) en aantal kleine waterkrachtcentrales te vinden. Het betreft riviercentrales. De ordegrootte van de vier ‘grote’ waterkrachtcentrales in Nederland ligt tussen 1,8 MW en 14 MW. Het totale vermogen aan waterkrachtcentrales in Nederland bedraagt circa 38 MW.(Klunne) Deze centrales leverden in 2006 circa 106 GWh aan elektriciteit, wat neerkomt op een aandeel van ongeveer 0,11% van de Nederlandse elektriciteitsproductie. Het maximum elektrisch rendement bedraagt ongeveer 90% (van Duivendijk, 2004).
Zie appendix I-D voor een overzicht van de huidige waterkrachtcentrales in Nederland.

C. *Toekomst*

Waterkrachtcentrales waarbij hoogteverschillen in water een grote invloed hebben (stuwdammen), zijn voor toepassing in Nederland (en dus ook de Afsluitdijk) geen goede optie. De hoogteverschillen in Nederland zijn te klein om op een rendabele manier elektriciteit op te wekken.

Waterkrachtcentrales waarbij de stroomsnelheid van water een grote invloed heeft (riviercentrales), worden wel in Nederland toegepast. Echter zijn door de kleine schaal van deze waterkrachtcentrales de investeringskosten aanzienlijk hoger.

Het potentieel in Nederland aan opwekking van elektriciteit uit waterkracht ligt tussen 80 en 110 MW (Essent, 2006). Dit potentieel is gebaseerd op kleinschalige waterkrachtcentrales welke, per centrale, een vermogen zullen hebben dat niet groter dan 15 MW is. Een grove schatting van de hoeveelheid energie met:

$$E = PT \tag{I.1}$$

waarin:

E	=	energie	[Ws]
P	=	vermogen	[W]
T	=	tijd	[s]

Op basis van 300 productiedagen per jaar geeft dit:

$$E = 80 \cdot 10^6 \cdot 300 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \approx 576 \cdot 10^9 \; Wh/\,jaar = 576 \cdot 10^3 \; MWh/\,jaar$$

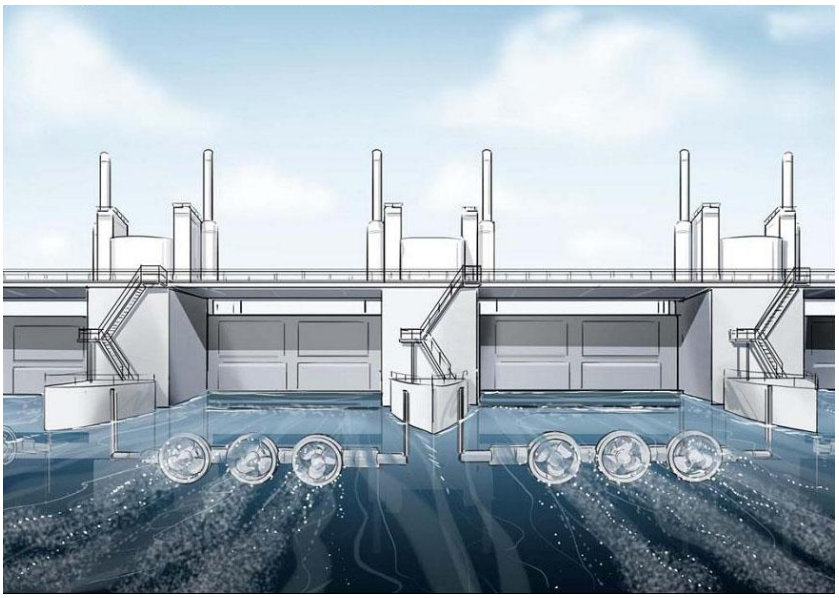
In het verleden zijn al tests gedaan en zijn er de volgende plannen voor toepassing in Nederland:

Waterkrachtcentrale Borgharen

Het plan betreft het plaatsen van een waterkrachtcentrale in rivier de Maas bij de plaats Borgharen. Deze waterkrachtcentrale zal een vermogen hebben van 7 MW, waarmee circa 30.000 MWh per jaar kan worden opgewekt. (SenterNovem, 2007) (Engineering-online)

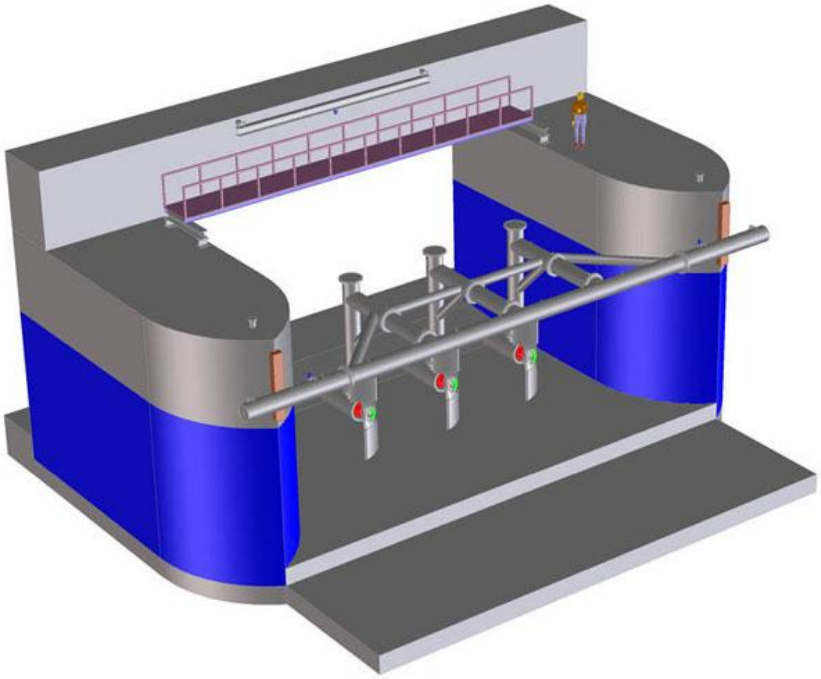
Plaatsing turbines in spuisluizen Afsluitdijk

Het plan betreft het plaatsen van waterturbines in de spuikokers van de huidige spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand. Uit proeven is gebleken dat met 75 turbines (drie per spuikoker) maximaal 2,625 MW elektrisch vermogen kan worden opgewekt. Uitgaande van gemiddeld de helft van dit vermogen gedurende het laagwatergetijde kan circa 10.000 MWh per jaar worden opgewekt. (RWS, 2006)



Figuur I.2 Artist impression van stromingsturbines in de spuikokers van de Afsluitdijk (RWS, 2006)

In 2005 heeft Teamwork Technology een test uitgevoerd waarbij een turbine in een spuikoker is geplaatst, waarmee haalbaarheid is aangetoond. Op dit moment is Teamwork Technology bezig met voorbereidingen om een test te gaan uitvoeren met drie turbines. (Technology)



Figuur I.3 Artist impression van stromingsturbines in de spuikokers van de Afsluitdijk (Technology)

D. *Toepassing* Afsluitdijk

Uit het voorgaande blijken er al plannen te zijn voor het opwekken van elektriciteit door turbines in de huidige spuisluizen in Afsluitdijk. Echter is dit tegenstrijdig met de achterliggende gedachte van het zo snel mogelijk afvoeren van IJsselmeerwater naar de Waddenzee gedurende laagwater. Door het plaatsen van turbines in of nabij de kokers wordt er een extra weerstand gecreëerd. Dit is interessant voor de opwekking van elektriciteit, maar verlaagt de afvoer van IJsselmeerwater. Er wordt op dit moment gekeken naar de vergroting van spuicapaciteit bij de Afsluitdijk, terwijl het plaatsen van turbines het probleem betreffende het afvoeren van IJsselmeerwater groter maakt. Door voor voldoende afvoercapaciteit te zorgen kunnen problemen worden voorkomen.

Om te kunnen bepalen wat het potentieel van de Afsluitdijk is, wordt de volgende vergelijking gebruikt:

$$P = \rho g Q H \qquad \text{(I.2)}$$

waarin:

P	=	vermogen	[W]
ρ	=	dichtheid	$[\mathrm{kg/m^3}]$
g	=	zwaartekrachtsversnelling	$[\mathrm{m/s^2}]$
Q	=	debiet	$[\mathrm{m^3/s}]$
H	=	hoogteverschil	[m]

Uitgaande van de volgende gegevens (RWS, 2005):

ρ	=	$1.000\ \mathrm{kg/m^3}$
g	=	$9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$
Q_{zomer}	=	$325\ \mathrm{m^3/s}$
Q_{winter}	=	$650\ \mathrm{m^3/s}$
H	=	0,25 m

geeft dit het volgende gemiddelde vermogen:

$P_{zomer} = 1.000 \cdot 9{,}81 \cdot 325 \cdot 0{,}25 = 797.062{,}5W \approx 0{,}8\ MW$

$P_{winter} = 1.000 \cdot 9{,}81 \cdot 650 \cdot 0{,}25 = 1.594.125W \approx 1{,}6\ MW$

Opmerking: Op dit moment is het hoogteverschil tussen het IJsselmeer en de Waddenzee bij laagwater ongeveer 0,50 m. Van 2000 tot 2050 zal de zeespiegelstijging naar verwachting 0,25 m bedragen. En van 2000 tot 2100 zal de zeespiegelstijging naar verwachting 0,60 m zijn.(RWS, 2006)

Zie appendix I voor een overzicht van het potentieel aan energie voor de Afsluitdijk.

E. *Voor- en nadelen*

Tot slot zullen de voor- en nadelen van elektriciteitsopwekking uit waterkracht voor de Afsluitdijk nog worden gegeven:

+ Waterkracht is een onuitputtelijke bron.
+ Het is een duurzame vorm van elektriciteitsopwekking, aangezien bij het opwekken van elektriciteit bijvoorbeeld geen brandstoffen worden gebruikt.
+ Het elektrisch rendement van een waterkrachtcentrale ligt vrij hoog (maximaal ongeveer 90%). Het type turbines dat in de huidige spuisluizen getest wordt heeft een elektrisch rendement van ongeveer 42% (Technology).
+ Het is een betrouwbare methode van elektriciteitsopwekking doordat zowel de grootte als het moment van aanbod van waterkracht voorspelbaar is (ondanks de afhankelijkheid van het aanbod van de hoeveelheid naar beneden stromend water dat niet altijd constant is). Verder is de methode goed ontwikkeld.
+ De levensduur van een waterkrachtcentrale bedraagt gemiddeld 40 tot 50 jaar.
+ Het opwekken van elektriciteit uit waterkracht vindt plaats zonder schadelijke uitstoot en afval, echter dient wel rekening gehouden te worden met uitstoot bij het bouwen van een waterkrachtcentrale.

+ De kosten van elektriciteit uit waterkracht zijn sterk afhankelijk van de locatie van de waterkrachtcentrale. De toepassing van turbines in bijvoorbeeld spuisluizen kan economisch voordelig zijn. Bij toepassing van turbines in de huidige spuisluizen bedragen de kosten ongeveer 17 miljoen euro.
− Het is alleen mogelijk om elektriciteit op te wekken tijdens de periodes van spuien (de periode van laagwater). Dit houdt in dat het bij een normale laagwaterstand van de Waddenzee mogelijk is om ongeveer vier uur te spuien per getijdencyclus van 12 uur en 25 minuten.
− Vanwege het relatief geringe aanbod aan waterkracht en de relatief geringe capaciteit van de waterkrachtcentrales in Nederland zal de opwekking van elektriciteit met waterkrachtcentrales niet kunnen dienen als vervanging van traditionele centrales.
− Het potentieel voor de Afsluitdijk is in vergelijking tot andere duurzame methoden van energieconversie niet erg hoog (bij H = 0,25 m geldt een vermogen P_z = 0,8 MW en P_w = 1,6 MW en bij H = 0,50 m geldt een vermogen P = 2,625 MW_p (RWS, 2006)) en zal in de toekomst alleen maar afnemen.
− De realisatietijd bij toepassing van turbines in nieuw te bouwen spuisluizen zal lang zijn.
− De terugverdientijd op zowel energetisch als economisch vlak zal van lange duur zijn.
− Er kan een mogelijke aantasting van de leefomgeving en ecologisch waardevolle gebieden plaatsvinden.
− Een waterkrachtcentrale kan een negatieve invloed hebben op de fauna (bijvoorbeeld vissterfte).
− Indien turbines in de huidige en eventuele toekomstige spuisluizen geplaatst worden zal dit een nadelig effect hebben op de afvoercapaciteit van de spuisluizen aangezien turbines weerstandselementen vormen in de spuisluizen.

I.5.2 Getijden

Getijden ontstaan onder invloed van gravitatiekrachten tussen zon, maan en aarde waardoor ophopingen van water ontstaan (hoogteverschillen). Deze vorm van energie kan op dezelfde manier als energie uit waterkracht nuttig worden gemaakt voor de mens.

A. Methode

Onder invloed van gravitatiekrachten tussen zon, maan en aarde ontstaan getijden. Doordat de aantrekkingskracht op het water niet overal op hetzelfde moment gelijk is ontstaan ophopingen van water. Als gevolg hiervan ontstaan voorspelbare getijdenstromingen. Deze stromingen zijn verantwoordelijk voor het ontstaan van eb en vloed. Het hoogteverschil van het water is de drijvende kracht voor deze getijdenstromingen. Het verschil tussen eb en vloed op open zee is op de meeste plaatsen in de wereld slechts enkele decimeters. Echter zijn in de buurt van bepaalde kusten trechtervormige inhammen aanwezig waarin veel grotere verschillen tussen eb en vloed te zien zijn. Dit verschil kan gebruikt worden om energie mee op te wekken. Er zijn drie methoden om energie op te wekken uit getijden, te weten:

1. Energie uit getijdenstroming
   In het geval van energie uit getijdenstroming wordt kinetische energie omgezet in elektriciteit. De conversie vindt plaats met vrije turbines in de getijdenstroming.
2. Energiewinning uit getijverschil
   Energie ten gevolge van het hoogteverschil tussen eb en vloed kan worden omgezet in elektriciteit door bij vloed een bassin vol te laten stromen. Bij eb stroomt het water uit het bassin, waarbij het water door een turbine stroomt. Het wegstromende water drijft een turbine aan.
3. Energie uit deining
   Deining is een trage, lage golfslag. Energie uit deining is alleen kansrijk bij kusten die direct aan één van de oceanen grenzen. De deining op een oceaan is vele malen hoger en krachtiger dan op de Noordzee. De energie-inhoud van de oceaandeining is enkele orden groter dan die in het Nederlandse gedeelte van de Noordzee.(Altran Technologies Netherlands BV, 2004)

Opmerking: aangezien Nederland niet direct aan een oceaan ligt met als gevolg korte en weinig krachtige deiningsgolven, zal deining niet verder beschouwd worden als mogelijke energiebron.

B. *Algemene gegevens*
In Nederland zijn op dit moment geen getijdencentrales aanwezig, wel zijn er studies uitgevoerd naar getijdencentrales in de Ooster- en Westerschelde. De resultaten uit deze studies zullen hieronder worden beschouwd:

Oosterschelde (Ecofys, 2000)
Uit de studie voor energieopwekking uit het getijverschil in de Oosterschelde is het volgende gebleken:

- Energieopwekking uit het getijverschil (het verschil tussen eb en vloed) biedt geen goede kansen in de Oosterschelde.
- Er is een groot aanbod (734 MW), echter is de implementatie, met name op grote schaal, in strijd met de doelstellingen van het beleidsplan.
- Het is vooralsnog economisch onrendabel om elektriciteit op te wekken bij een hoogteverschil van minder dan 7 meter.
- Er zijn geen bijkomende kostenbesparende voordelen voor de Oosterschelde in de vorm van bijvoorbeeld een verbindingsweg, omdat deze infrastructuur al aanwezig is.
- Er zijn weinig perspectieven om de opgedane ervaring en kennis elders toe te passen in Nederland.

Uit dezelfde studie is voor energieopwekking uit getijdenstroming het volgende gebleken:

- Energieopwekking uit de getijdenstroming biedt meer kansen in de Oosterschelde.
- Het aanbod is beperkt tot een aantal specifieke locaties, waarvan de stormvloedkering het grootste aanbod biedt (100-200 MW), daarbuiten is het aanbod geringer gezien de lage stroomsnelheden (1-10 MW).
- Realisatie op grote schaal van deze optie is in strijd met het Beleidsplan, vanwege de invloed op getijverschil. Een eerste orde benadering toont aan dat het effect van een grootschalige toepassing (10 MW) een niet verwaarloosbaar effect op het getijverschil in de Oosterschelde zal hebben (in de orde van 4 cm op het huidige getijverschil van 285 cm). Gezien dit effect bestaat er twijfel over het achterwege blijven van mogelijk negatieve gevolgen voor het ecosysteem (voorzorgsprincipe Beleidsplan). Het opwekken van energie uit getijdenstroming op grote schaal in de Oosterschelde kan daarom niet worden aanbevolen.
- Het effect van kleinschalige energieopwekking uit de getijdenstromingen (tot 500 kW) op het getijverschil is veel kleiner (0,4 mm per 100 kW opgesteld vermogen). Hoewel dit effect niet ontkend mag worden, wordt het belang ervan verwaarloosbaar geacht (door Rijkswaterstaat) ten opzichte van andere aanpassingsprocessen die de Oosterschelde ondergaat. Kleinschalige energieopwekking uit de getijdenstromingen lijkt dus acceptabel, mits de installatie voldoet aan nog op te stellen randvoorwaarden ten aanzien van bijvoorbeeld verankering en het effect op de bodem.
- Er zijn perspectieven voor toepassingen van deze vorm van energieopwekking elders in Nederland. Hoge stromingen zijn te vinden voor de Zeeuwse kust in de Noordzee, de Westerschelde en rond de Waddeneilanden.

Westerschelde (Altran Technologies Netherlands BV, 2004)
Uit de studie voor energieopwekking uit het getijverschil in de Westerschelde is het volgende gebleken:

- De getijdenstroming is goed voorspelbaar zowel wat betreft grootte als moment van optreden dit in tegenstelling tot windenergie. De variatie in de getijdenstroming is klein in vergelijking met windenergie.
- De condities in de Westerschelde zijn geschikt voor het winnen van energie uit getijdenstroming. De stroomsnelheid is op diverse locaties meer dan 20% van de tijd meer dan 1 m/s en de diepte meer dan 10 m (bij laag water).
- De meeste locaties die aan bovenstaande criteria voldoen, liggen echter in de vaargeul. De plaatsing van stromingsturbines in/naast de vaargeul is zeer waarschijnlijk niet acceptabel onder meer omdat de diepte van de vaargeul afneemt.
- Enkele locaties vlak naast een vaargeul voldoen aan de drie gestelde criteria over de stroomsnelheid, de diepte en liggen buiten de vaargeul.
- Langs de Zeeuwse kust zijn geen mogelijkheden voor het opwekken van energie uit golven als gevolg van te lage energie-inhoud.
- Uit berekeningen komt naar voren dat getijdenstroming de potentie heeft om duurzame elektriciteit op te wekken, bij grootschalige systemen en gunstige condities, tegen een kostprijs vanaf € 0,02/kWh.
- Het gemiddelde vermogen van de drie locaties is 6,4 MW. De jaarlijkse opbrengst is 19,5 GWh. Aangezien dit afkomstig is van meer dan 4.000 onderwaterturbines mag worden aangenomen dat 3 grote offshore windturbines, die een vergelijkbare opbrengst leveren, vele malen goedkoper zijn te realiseren. Opgemerkt dient te worden dat de stromingssnelheid acceptabel is, maar de diepte beperkt is waardoor het op te wekken vermogen relatief laag is. Het potentieel voor de Westerschelde is dus laag.

Verder kan nog ter indicatie worden gegeven dat bij energieopwekking uit getijdenstroming het maximum theoretisch rendement uit een vrije stroom gelijk is aan 16/27 van de totale kinetische energie, ofwel de prestatiecoëfficiënt $C_p \approx 0,593$ (wet van Betz).(Altran Technologies Netherlands BV, 2004) In de praktijk blijkt een conversierendement tussen de 10% en 40% haalbaar (afhankelijk van het type rotor).

C. *Toekomst*

Energie uit getijdenstroming
Er zijn perspectieven voor toepassingen voor energie uit getijdenstroming in Nederland. Hoge stromingen zijn te vinden voor de Zeeuwse kust in de Noordzee, de Westerschelde en rond de Waddeneilanden. (Ecofys, 2000)

Energie uit getijverschil
Er is een plan voor een getijdencentrale bij de Afsluitdijk, dit zal hieronder worden besproken.

Getijdencentrale(RWS, 2006)
Met een opslagbekken bij de Afsluitdijk kan zowel bij opkomend als afgaand getij waterkracht uit de getijdenstroming worden gewonnen en omgezet in elektriciteit. Zo'n energiebekken wordt gevuld en geleegd via een doorlaatwerk in de Afsluitdijk met omkeerbare waterturbines voor ultraklein verval. De gedachte gaat uit naar een doorlaatwerk van circa 2.000 m lengte. Een inlaatwerk vanuit het IJsselmeer kan worden aangelegd, maar is niet strikt noodzakelijk. Zo'n werk kan wel een deel van de spuicapaciteit leveren en een combinatie met een brakwaterzone in het bekken mogelijk maken. Het is alleen een inlaatwerk om geen brak water vanuit het bekken in het IJsselmeer te laten komen. De turbines in de getijdencentrale kunnen ook worden omgezet in de pompstand, waarmee water naar de Waddenzee gepompt kan worden, zodat berging in het bekken wordt gecreëerd. Hierdoor kan het peil op het IJsselmeer beter worden gehandhaafd.

Op grond van berekeningen mag een maximaal vermogen van 100 MW_p worden verwacht bij een bekkenoppervlak van 200 km^2. De prijs van deze elektriciteit is berekend op € 0,15/kWh (bron STT/Beweton).

D. Toepassing Afsluitdijk

Niet alle aan beide onderzoeken (*Kansen voor energiewinning uit getijden in de Oosterschelde* en *Potentieel voor energieopwekking uit getijden in de Westerschelde*) verbonden conclusies zijn van toepassing, maar door de volgende aspecten te beschouwen kan vastgesteld worden dat het onrendabel is om op basis van getijdenstroming energie bij de Afsluitdijk te winnen:

- De stroomsnelheden ten gevolge van het getijde ter plaatse van de Afsluitdijk komen gemiddeld voor meer dan de helft van de Afsluitdijk niet boven 1 m/s (de Jong, et al., 2005). In het rapport van de studie naar de Westerschelde is vermeld dat een stroomsnelheid van minder dan 1 m/s over het algemeen niet interessant is voor energieopwekking. Dit is gebaseerd op de huidige stand der techniek. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat er altijd een cut-in stroomsnelheid (minimum stroomsnelheid om rotor op gang te brengen) is, welk momenteel in de orde van 0,7 m/s ligt.
- Verder geldt nog dat de waterdiepten nabij de Afsluitdijk zijn kleiner dan 10 meter. De conversieapparaten (voor energie uit getijdenstroming) die momenteel in ontwikkeling zijn, leggen de eis op dat de locatie dieper is dan 10 meter. Dit geldt niet voor drijvende systemen en ook niet voor systemen die aan niet natuurlijke objecten bevestigd kunnen worden.
- Als laatste geldt als hoofdargument dat de Afsluitdijk simpelweg niet benodigd is voor het converteren van energie uit getijdenstroming in de Waddenzee. Dit is bijvoorbeeld ook midden in de Waddenzee te realiseren zonder dat de Afsluitdijk benodigd is.

Opmerking: energie uit getijdenstroming zal hierna om voorgenoemde redenen niet meer worden behandeld.

En door de volgende aspecten te beschouwen kan vastgesteld worden dat het onrendabel is om op basis van getijverschil energie bij de Afsluitdijk te winnen:
Het getijverschil ter plaatse van de Afsluitdijk ligt bij Den Oever en bij Kornwerderzand gemiddeld onder 2,00 meter(Ministerie van Verkeer en Waterstaat). In het rapport van de studie naar de Oosterschelde is vermeld dat een hoogteverschil van minder dan 7 meter vooralsnog economisch onrendabel is om energie op te wekken.

Het potentieel aan energie uit getijverschil voor de Afsluitdijk wordt berekend met vergelijking (I.2).

Uitgaande van de volgende gegevens (RWS, 2006):

ρ = 1.025 kg/m^3

g = 9,81 m/s^2

Q = 5.000 m^3/s

H = 2 m

geeft dit:

$P = 1.025 \cdot 9{,}81 \cdot 5.000 \cdot 2 = 100.552.500\ W \approx 100\ MW_p$

Zie appendix I voor een overzicht van het potentieel aan energie voor de Afsluitdijk.

E. *Voor- en nadelen*

Tot slot zullen de voor- en nadelen van energie uit getijverschil voor de Afsluitdijk nog worden gegeven:

+ Het getijde is een onuitputtelijke bron.
+ Het is een duurzame vorm van elektriciteitsopwekking, aangezien bij het opwekken van elektriciteit bijvoorbeeld geen brandstoffen worden gebruikt.
+ Het elektrisch rendement van een getijdencentrale ligt vrij hoog (maximaal ongeveer 90%).
+ Het is een betrouwbare methode van energieconversie doordat zowel de grootte als het moment van aanbod van het getijde goed voorspelbaar is. Verder is de methode is goed ontwikkeld.
+ Het potentieel bij de Afsluitdijk is in vergelijking tot andere duurzame methoden van energieconversie vrij hoog (P = 100 MW_P), echter is dit vermogen niet continu beschikbaar wat zorgt voor een langere energetische terugverdientijd dan wanneer het vermogen continu beschikbaar is.
+ De levensduur van een getijdencentrale (getijverschil) bedraagt gemiddeld 40 tot 50 jaar (gebaseerd op de levensduur van een waterkrachtcentrale).
+ Het opwekken van elektriciteit uit het getijverschil vindt plaats zonder schadelijke uitstoot en afval, echter dient wel rekening gehouden te worden met uitstoot bij het bouwen van een getijdencentrale.
+ Een getijdencentrale (getijverschil) heeft een beperkte visuele impact op het landschap.
− Het is alleen mogelijk om elektriciteit op te wekken tijdens de periodes van spuien (de periode van laagwater). Dit houdt in dat het bij een normale laagwaterstand van de Waddenzee mogelijk is om ongeveer vier uur te spuien per getijdencyclus van 12 uur en 25 minuten.
− Vanwege het relatief geringe aanbod aan getijdenenergie in Nederland zal de opwekking van elektriciteit uit het getijverschil niet kunnen dienen als vervanging van traditionele centrales.
− De realisatietijd van een getijdencentrale zal lang zijn.
− De terugverdientijd op economisch vlak zal van lange duur zijn, vanwege de geringe beschikbaarheid van het potentieel.
− Er kan een mogelijke aantasting van de leefomgeving en ecologisch waardevolle gebieden plaatsvinden.
− Een getijdencentrale kan een negatieve invloed hebben op de fauna (bijvoorbeeld vissterfte).
− De kosten van elektriciteit uit getijden zijn sterk afhankelijk van de locatie. Door het geringe potentieel in Nederland zal het een dure methode zijn. De kosten voor een getijdencentrale (getijverschil) in de Afsluitdijk bedragen ongeveer 2,5 miljard euro (RWS, 2006).
− Door het realiseren van een getijdencentrale in het IJsselmeer zal een deel van het IJsselmeer niet meer als zoetwatervoorraad beschikbaar zijn.

I.5.3 Golfslag

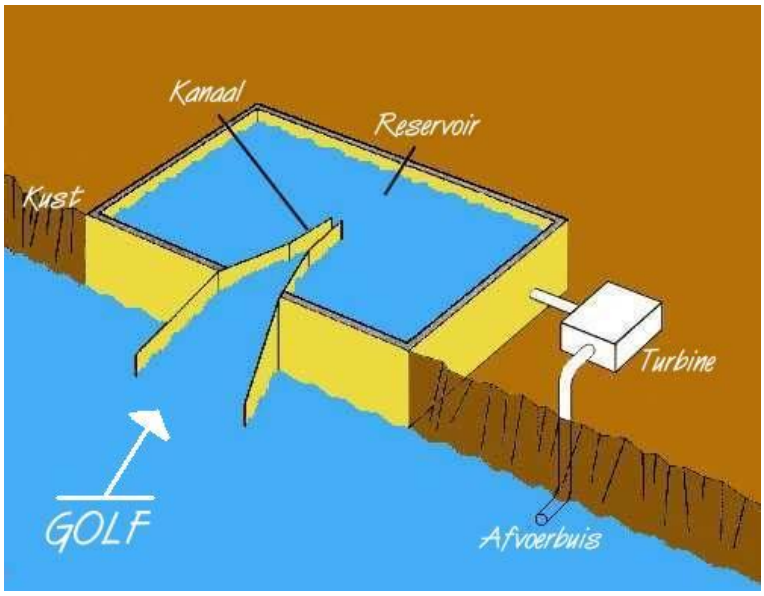
Golfslagenergie is energie die te winnen is uit de snel wisselende waterhoogte op zee door aanwezigheid van golven.
Golfslagenergie is indirect een vorm van zonne-energie: de zonnewarmte veroorzaakt wind welke vervolgens op haar beurt door de verstoring van de spanning van het wateroppervlak golfslagenergie veroorzaakt. Golfslagenergie kan door toepassing van bijvoorbeeld golfgeneratoren worden omgezet in een voor de mens nuttige vorm van energie.

A. Methode

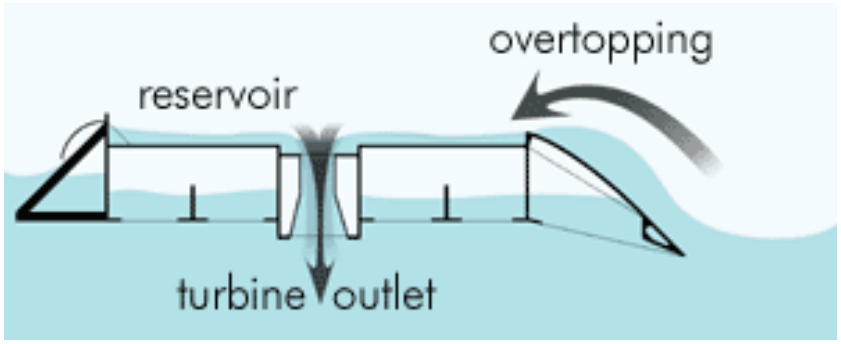
Bij opwekking van elektriciteit uit golfslagkracht wordt energie uit de snel wisselende waterhoogte gehaald. De golven ontstaan op de oceaan door interactie tussen wind en het wateroppervlak. De hoogte van de golven wordt bepaald door de wind (snelheid, periode en strijklengte), bodemprofiel (waardoor de golfslagenergie gebundeld of verspreid kan worden) en stromingen. (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007) Er worden twee typen convertors onderscheiden op basis van (van Duivendijk, 2004):

1. golfoverslag

Met taps toelopende kanalen wordt de energie van een het kanaal binnenstromende golf omgezet in een snelle beweging van een deel van de golf, die wordt gebruikt om dat water in een hoger gelegen reservoir te brengen. Vervolgens stroomt het water uit het reservoir naar zee terug via een turbine. Dit type convertors is zowel voor als ter plaatse van de kust gelegen.



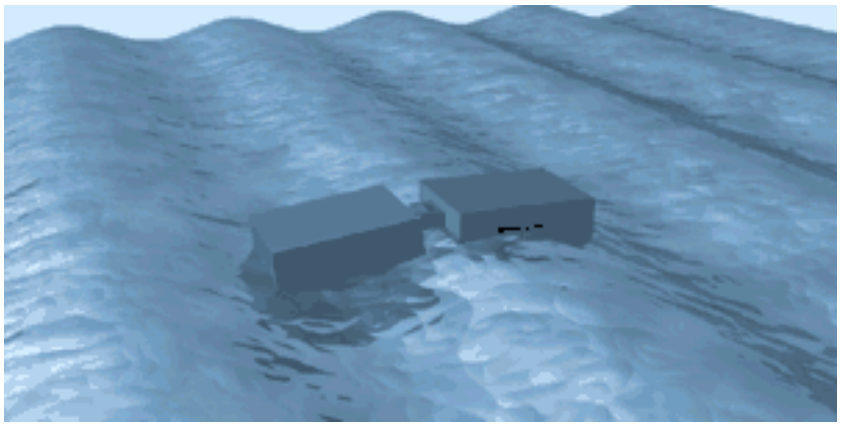
Figuur I.4 Energie uit golfoverslag ter plaatse van de kust (Altran Technologies Netherlands BV, 2004)



Figuur I.5 Energie uit golfoverslag voor de kust (Wave Dragon Aps, 2007)

2. waterbeweging
   Dit type convertors zet bewegingsenergie om in elektrische energie. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt in vijf typen, te weten: golfdemper, puntbron, oscillerende golfbeweging, oscillerende water kolom en drukgradiënt onder water.

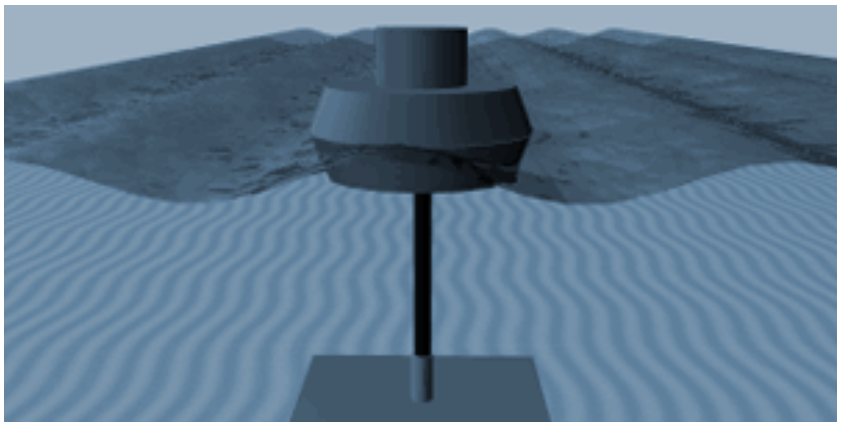
   Golfdemper
   Het principe van het eerste type is het absorberen van (een deel van) de energie van de passerende golf, waarbij de demper in de golf 'ligt'. (van Duivendijk, 2004)



Figuur I.6 Golfdemper (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007)

Puntbron

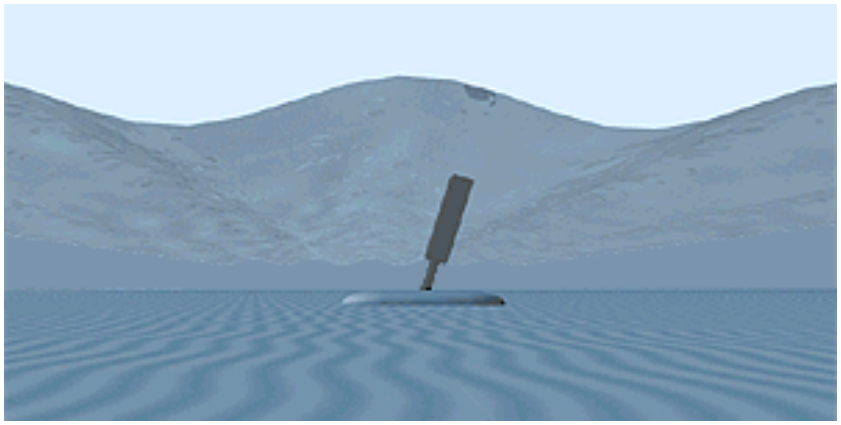
Het tweede type is gebaseerd op het absorberen van energie met een enkele unit uit een golflengte die groter is dan de lengte van unit zelf (bijvoorbeeld tweemaal de eigen lengte), bij voorkeur vanuit alle richtingen. (van Duivendijk, 2004)



Figuur I.7 Puntbron (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007)

Oscillerende golfbeweging

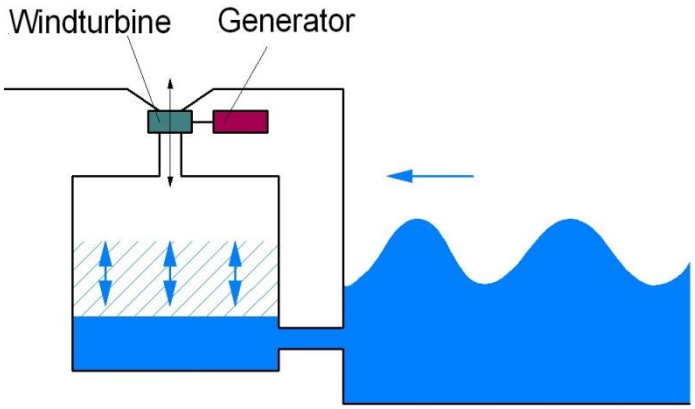
Het principe van het derde type is winnen van energie uit de beweging van de waterdeeltjes in een translatiegolf. De arm oscilleert als een slinger welke is bevestigd met een scharnier om zo de beweging van het golvende water te kunnen volgen. (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007)



Figuur I.8 Oscillerende golfbeweging (European Marine Energy Centre (EMEC), 2007)

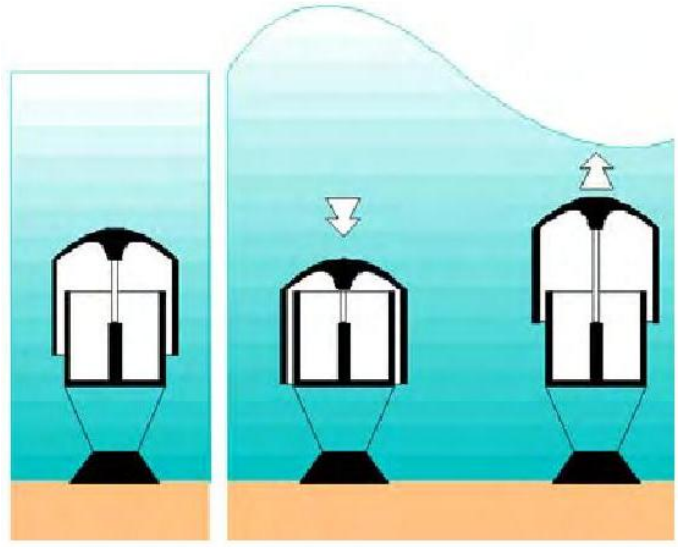
Oscillerende waterkolom

Het vierde type is gebaseerd op een met water gevulde kamer die in contact staat met de zee via een opening onder het wateroppervlak. Door de golven zal het water in de kamer gaan bewegen (oscilleren), evenals de lucht boven het water in deze kamer. De lucht drijft een turbine aan waarmee in combinatie met een generator elektriciteit opgewekt kan worden. (van Duivendijk, 2004)



Figuur I.9 Oscillerende waterkolom

Drukgradiënt onder water
Voor het vijfde type worden ook oscillerende waterkolommen gebruikt, waarmee op basis van drukverschillen onder water elektriciteit kan worden opgewekt.



Figuur I.10 Drukgradiënt onder water (Altran Technologies Netherlands BV, 2004)

Verder zijn er nog enkele andere methoden die zijn gebaseerd op voorgaande principes, welke hier verder niet beschouwd zullen worden.

B. Algemene gegevens

In Nederland wordt op dit moment geen elektriciteit (op grote schaal) uit golfslagenergie opgewekt. Wel zijn er enkele ideeën uitgewerkt tot prototype en getest. Er mag worden aangenomen dat een elektrisch rendement van 50% haalbaar is (Altran Technologies Netherlands BV, 2004).

C. Toekomst

Elektriciteit opwekken uit golfslagenergie in Nederland is een optie, echter zijn de golfhoogtes aan de Nederlandse kust te klein (bevatten te weinig energie) om dit op een economisch rendabele manier

te realiseren. Ook in de nabije toekomst zal elektriciteit uit golfslagenergie voor Nederland niet rendabel worden.
Het potentieel voor de Nederlandse kust aan opwekking van elektriciteit uit golfslagenergie wordt berekend aan de hand van de volgende vergelijking:

$$P = \frac{1}{8}\rho g H^2 nc \qquad \text{(van Duivendijk, 2004)} \qquad \text{(I.3)}$$

Waarin:

P	=	vermogen	[W]
ρ	=	dichtheid	$[\mathrm{kg/m^3}]$
g	=	zwaartekrachtsversnelling	$[\mathrm{m/s^2}]$
H	=	golfhoogte	[m]
n	=	factor (verhouding groepssnelheid en voortplantingssnelheid)	[-]
c	=	voortplantingssnelheid	$[\mathrm{m/s}]$

Uitgaande van de volgende gegevens (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007):

ρ	=	$1.025\,kg/m^3$
g	=	$9{,}81\,m/s^2$
H_{m0}	=	$1{,}20m$
n	=	$1/2$ (diep water)
c	=	$\frac{gT}{2\pi}\,\mathrm{m/s}$
T_{m02}	=	$4{,}45\,s$

geeft dit:

$$P = 1/8 \cdot 1.025 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}20^2 \cdot 1/2 \cdot \frac{9{,}81 \cdot 4{,}45}{2\pi} \approx 6.288\,W/m \approx 6{,}3\,kW/m$$

Volgens bovenstaande berekening komt het vermogen per meter golfbreedte neer op 6,3 kW. Dit is echter te optimistisch als dit met gemeten waarden van 0,5 kW/m bij de Westerschelde vergeleken wordt (Altran Technologies Netherlands BV, 2004).

D. Toepassing Afsluitdijk

Zoals eerder vermeld is elektriciteit opwekken uit golfslagenergie in Nederland en dus ook de Afsluitdijk geen rendabele optie. Door de volgende aspecten te beschouwen kan vastgesteld worden dat het onrendabel is om ter plaatse van de Afsluitdijk elektriciteit uit golven op te wekken:

- Golfslagenergie
  In de studie naar elektriciteitsopwekking uit getijden is ook gekeken naar elektriciteitsopwekking uit golven. Hieruit is gebleken dat het een, voor de Afsluitdijk, onrendabele methode is.(Altran Technologies Netherlands BV, 2004)
- Potentieel Afsluitdijk
  Het potentieel voor de Afsluitdijk aan golfslagenergie is nog lager dan het potentieel bij de Nederlandse kust (Noordzee) vanwege de meer gesloten ligging. Het potentieel voor de Afsluitdijk aan opwekking van elektriciteit uit golfslagenergie wordt berekend aan de hand van vergelijking (I.3).

  Uitgaande van de volgende gegevens:

ρ	=	$1.025 kg/m^3$
g	=	$9,81 m/s^2$
H_{m0}	=	$0,20 m$
n	=	$1/2$ (diep water)
c	=	$\frac{gT}{2\pi}$ m/s
T_{m02}	=	$3\ s$

geeft dit:

$$P = 1/8 \cdot 1.025 \cdot 9,81 \cdot 0,20^2 \cdot 1/2 \cdot \frac{9,81 \cdot 3}{2\pi} \approx 118 W/m \approx 0,12 kW/m$$

Voor de totale lengte van de Afsluitdijk wordt dit berekend met:

$$P_{Afsluitdijk} = LP \qquad \text{(I.4)}$$

waarin:

$P_{Afsluitdijk}$	=	vermogen Afsluitdijk	[W]
L	=	lengte Afsluitdijk	[m]
P	=	vermogen per meter Afsluitdijk	[W/m]

met:

L	=	32.000 m
P	=	0,12 kW/m

geeft dit:

$$P_{Afsluitdijk} = 32.000 \cdot 0,12 = 3.840\ kW = 3,84\ MW$$

Zie appendix I voor een overzicht van het potentieel aan energie voor de Afsluitdijk.

E. *Voor- en nadelen*

Tot slot zullen de voor- en nadelen van elektriciteitsopwekking uit golfslagkracht voor de Afsluitdijk nog worden gegeven:

+ Golfslagkracht is een onuitputtelijke bron.
+ Het is een duurzame vorm van elektriciteitsopwekking, aangezien bij het opwekken van elektriciteit bijvoorbeeld geen brandstoffen worden gebruikt.
+ Het elektrisch rendement van golfenergieomzetters bedraagt ongeveer 50%
+ Het is een redelijk betrouwbare methode van elektriciteitsopwekking doordat het aanbod van golfslagenergie redelijk voorspelbaar is, echter is de opwekking van elektriciteit wel afhankelijk van het aanbod van wind dat niet altijd constant is.
+ Het opwekken van elektriciteit uit golfslagenergie vindt plaats zonder schadelijke uitstoot en afval, echter dient wel rekening gehouden te worden met een geringe hoeveelheid uitstoot bij het bouwen van een golfslagenergiecentrale.
+ De kans op aantasting van de leefomgeving en ecologisch waardevolle gebieden wordt zeer klein geacht.
+ Ook de invloed op de fauna is zeer gering.

- Vanwege het relatief geringe aanbod aan golfslagenergie in Nederland zal de opwekking van elektriciteit met golfslagenergiecentrales niet kunnen dienen als vervanging van traditionele centrales.
- Energie uit golfkracht is staat nog in de kinderschoenen en zal nog verder ontwikkeld moeten worden.
- Constructies die zich ter plaatse van de waterlijn bevinden zijn kwetsbaar onder invloed van bijvoorbeeld hoge golven, wat een mogelijk nadeel kan zijn.
- Het potentieel voor de Afsluitdijk is in vergelijking tot andere duurzame methoden van energieconversie niet erg hoog vanwege de gesloten ligging (P = 3,84 MW).
- De realisatietijd zal lang zijn aangezien de techniek voor conversie nog verder ontwikkeld dient te worden.
- De terugverdientijd op zowel energetisch als economisch vlak zal van lange duur zijn, vanwege het lage potentieel.
- De kosten van elektriciteit uit golfslagkracht zijn vrij hoog (30.000 euro/kW geïnstalleerd vermogen voor een praktijkexperiment, welke in de toekomst zullen dalen tot 2.000 euro/kW geïnstalleerd vermogen)(Altran Technologies Netherlands BV, 2004).

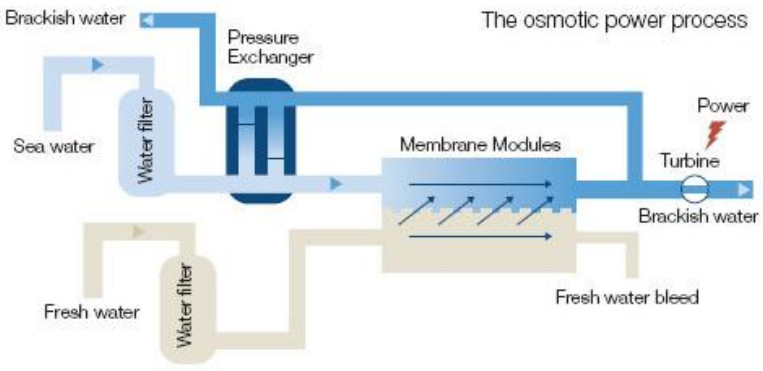
I.5.4 Zoutgradiënt

Het is mogelijk om uit water met een groot verschil in zoutgehalte energie te halen. Het verschil in zoutconcentratie tussen zee- en rivierwater kan hiervoor gebruikt worden.
Energie uit water met verschillende zoutgehalten is indirect een vorm van zonne-energie: het water verdampt door zonnewarmte, wordt door wind (ook een gevolg van temperatuurverschillen) omhoog getransporteerd en valt als regen weer op een berg of hoogte en stroomt weer naar de zee. Deze vorm van energie kan voor de mens nuttig worden gemaakt door het zoete en het zoute water met toepassing van een membraan samen te voegen.

A. Methode

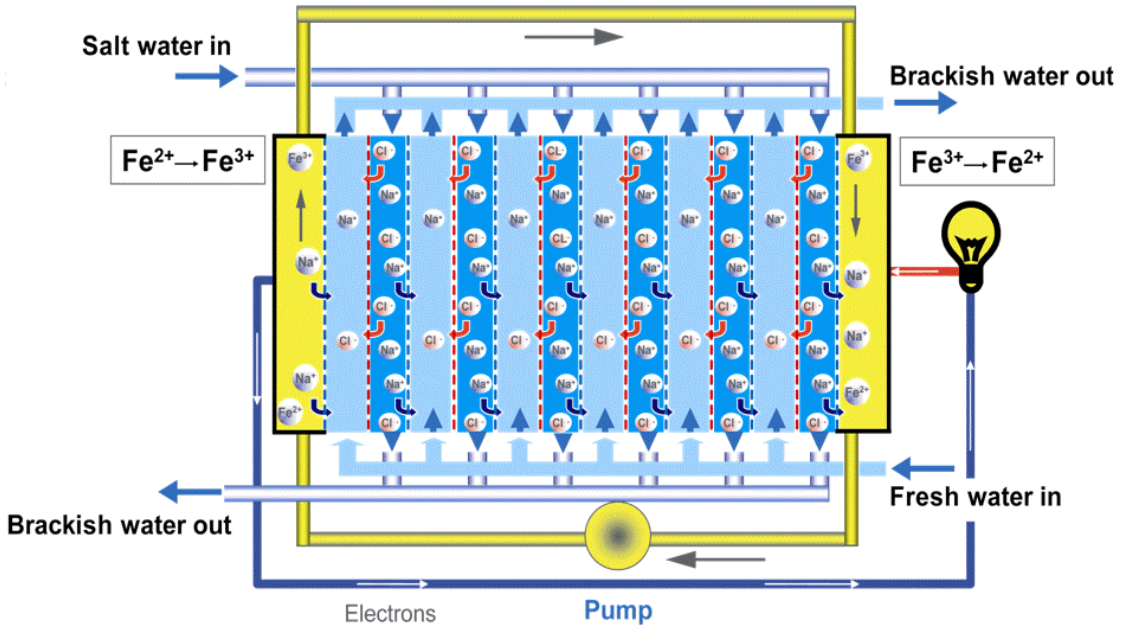
Bij het winnen van energie op basis van een zoutgradiënt, wordt het concentratieverschil tussen zoet en zout water gebruikt wordt om elektriciteit mee op te wekken. Deze methode wordt ook wel 'Blauwe energie' genoemd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen Blauwe energie:

1. Pressure Retarded Osmosis (PRO) (Statkraft, 2007): het zich wederzijds vermengen van twee vloeistoffen door een poreuze wand heen, hierdoor ontstaat een hoogteverschil waarmee (door een turbine) elektriciteit opgewekt kan worden.



Figuur I.11 Het PRO-proces vereenvoudigd in een diagram weergegeven (Statkraft, 2007)

2. Reversed Electro Dialysis (RED)(Kennislink, 2007): het zich wederzijds vermengen van twee vloeistoffen door een poreuze wand heen, hierdoor ontstaat een elektrisch potentiaalverschil waaruit elektriciteit opgewekt kan worden.



Figuur I.12 Emigratie van zoutionen door de speciale membranen zorgt voor elektrische stroom in de centrale (Redstack, 2007)

B. Algemene gegevens

In Nederland zijn op dit moment nog geen 'Blue energy'-centrales te vinden. De PRO- en RED-technologieën zijn nog in ontwikkeling en worden op kleine schaal getest. Wel kunnen een aantal kenmerken ter indicatie worden gegeven:

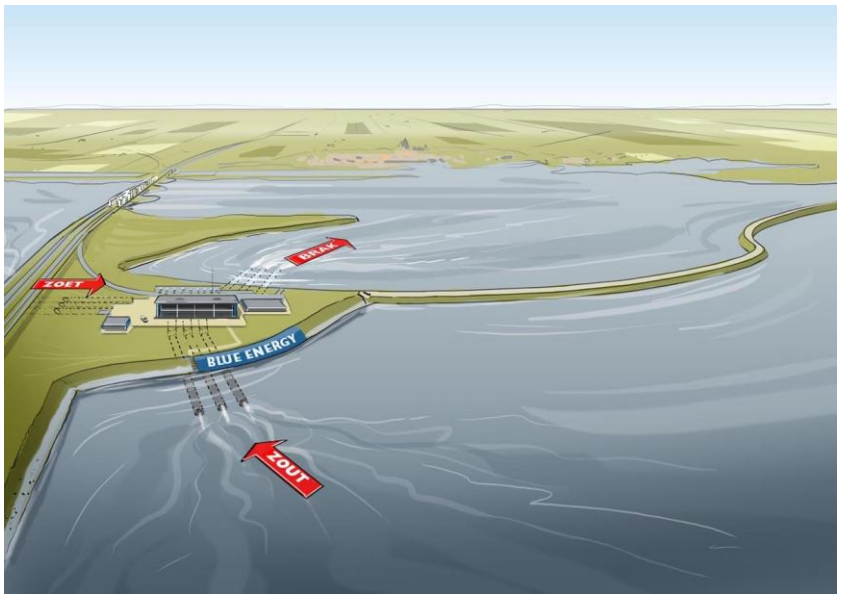
- Een 'Blue energy' (PRO)-centrale zal bestaan uit een centrale (in het geval van het prototype op het terrein van een papier pulp fabriek). Het prototype zal een vermogen hebben van 2-4 kW. (Statkraft, 2007)



Figuur I.13 Artist impression van een PRO-centrale op zeeniveau (Statkraft, 2007)

Deze methode is vooral geschikt als alternatief voor spuien waarbij de opwekking van elektriciteit een toegevoegd voordeel geeft.

- Een 'Blue energy' (RED)-centrale zal bestaan uit modules (ter grootte van een zeecontainer), waarbij een module een vermogen heeft van 250 kW.(Kema, 2005)



Figuur I.14 Artist impression osmosecentrale bij de Afsluitdijk (RWS, 2006)

Deze methode is vooral geschikt als alternatief waarbij de opwekking van elektriciteit de hoofdzaak is en waarbij het waterbeheer van ondergeschikt belang is.

C. *Toekomst*

Beide technologieën zijn nog in ontwikkeling waarna schaalvergroting toegepast dient te worden voordat 'Blue energy' commercieel beschikbaar zal worden. De verwachtingen zijn dat 'Blue energy' pas na 2010 grote schaal gerealiseerd kan worden. (RWS, 2006)

Het theoretisch potentieel in Nederland aan opwekking van elektriciteit met 'Blue energy' (RED) bedraagt circa 3.000 MW. Dit potentieel is gebaseerd op de hoeveelheid zoet water die de zee in stroomt bij Nederland. Dit bedraagt circa 3.000 m^3/s, bij een productie van 1 MW/m^3 zoet water zorgt dit voor een energiepotentieel van circa 3.000 MW. (Redstack, 2007b)

D. Toepassing Afsluitdijk

Voor toepassing van 'Blue energy' (RED) is de Afsluitdijk uitermate geschikt. De dijk vormt een 'harde' scheiding tussen zoet en zout water en is dus een goede locatie om een 'Blue energy'-centrale te situeren.

Het potentieel voor de Afsluitdijk bedraagt circa 200 MW. Dit is gebaseerd op de huidige afvoer van 200 m^3/s (100 m^3/s zoet en 100 m^3/s zout water). (RWS, 2006)

Zie appendix I voor een overzicht van het potentieel aan energie voor de Afsluitdijk.

E. *Voor- en nadelen*

Tot slot zullen de voor- en nadelen van elektriciteitsopwekking uit waterkracht voor de Afsluitdijk nog worden gegeven:

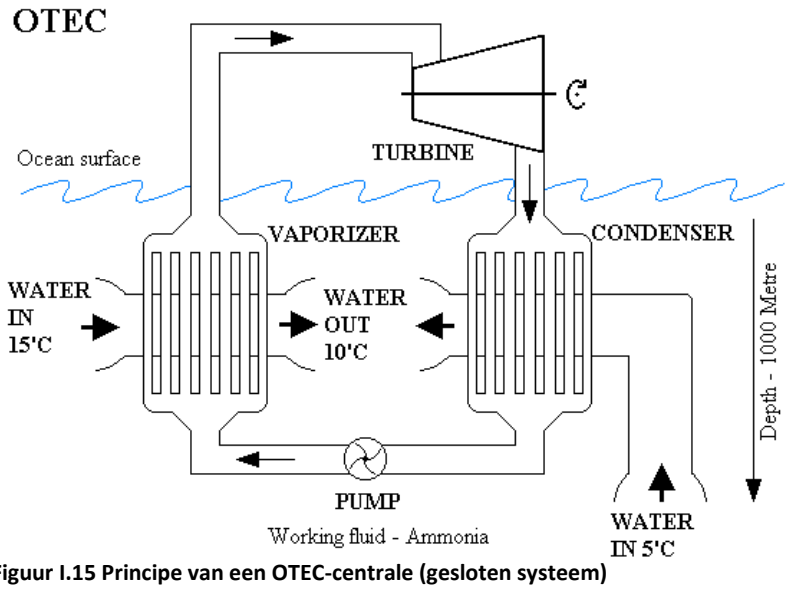
+ 'Blue energy' is een onuitputtelijke bron.
+ Het is een duurzame vorm van elektriciteitsopwekking, aangezien bij het opwekken van elektriciteit bijvoorbeeld geen brandstoffen worden gebruikt.
+ Het is een betrouwbare methode van elektriciteitsopwekking doordat het aanbod van zoet water goed voorspelbaar is.
+ Het potentieel bij de Afsluitdijk is in vergelijking tot andere duurzame methoden van energieconversie vrij hoog (P = 200 MW_P).

+ De terugverdientijd op energetisch vlak zal van korte duur zijn, vanwege het hoge potentieel. De economische terugverdientijd is op dit moment nog lang vanwege de hoge kosten voor de membranen.
+ 'Blue energy' heeft een beperkte visuele impact op het landschap.
+ Er zullen geen veranderingen in de leefomgeving en ecologisch waardevolle gebieden plaatsvinden aangezien een 'Blue energy'-centrale nagenoeg geen verandering geeft in de concentratie van en de hoeveelheid spuiwater.
− Vanwege de afhankelijkheid van het totale aanbod aan rivierwater in Nederland (circa 3.000 m^3/s) zal de opwekking van elektriciteit met 'Blue energy' niet kunnen dienen als vervanging van traditionele centrales.
− Blue energie staat wordt momenteel nog getest op laboratoriumschaal en zal nog verder ontwikkeld moeten worden.
− De realisatietijd van een 'Blue energy'-centrale zal lang zijn aangezien de technologie nog verder ontwikkeld dient te worden voor grootschalige toepassing.
− Het opwekken van elektriciteit uit 'Blue energy' vindt niet plaats zonder schadelijke uitstoot en afval, er zijn er chemicaliën benodigd voor het reinigen van de membranen (PRO) en de membranen moeten worden beschouwd als chemisch afval door zware metalen die aanwezig zijn in zeewater (RED). Verder dient wel rekening gehouden te worden met uitstoot bij het bouwen van een 'Blue energy'-centrale.
− Een 'Blue energy'-centrale kan een negatieve invloed hebben op de fauna (bijvoorbeeld vissterfte).
− De kosten van 'Blue energy' zijn hoog door bijvoorbeeld de kostbare membranen die gebruikt worden. De investeringskosten voor een 'Blue energy'-centrale bij de Afsluitdijk bedragen ongeveer 400 miljoen euro (RWS, 2006).
− De membranen die gebruikt worden bij 'Blue energy'-centrales kunnen verstopt raken en dienen voor optimale energieconversie periodiek gereinigd te worden. Het gevolg hiervan is voor korte tijd een elektriciteitsgebruik (reinigen gebeurd door omkeren van het proces) in plaats van elektriciteitsopwekking.

I.5.5 Temperatuurgradiënt

A. Methode

In het geval van temperatuurverschillen (ook wel bekend als Ocean Thermal Energy Conversion, afgekort OTEC) wordt er energie opgewekt door het temperatuurverschil tussen het oppervlaktewater en de diepere lagen van de oceaan om elektriciteit op te wekken. De oceanen staan continu bloot aan de warmte uit zonnestraling. Hoe hoger in de waterkolom, hoe warmer het water (tot een bepaald maximum). De verschillende temperaturen van het water zorgen er in combinatie met een warmtewisselaar voor (met een pomp) dat er een turbine aangedreven wordt, welke vervolgens zorgt voor de opwekking van elektriciteit.(van Duivendijk, 2004)



Figuur I.15 Principe van een OTEC-centrale (gesloten systeem)

OTEC is voor Nederland (en dus ook de Afsluitdijk) geen mogelijke optie aangezien de wateren in en direct nabij Nederland niet diep genoeg zijn (Noordzee bij Nederlandse kust niet dieper dan ongeveer 30 meter), met als gevolg een gering temperatuursverschil tussen bodem en wateroppervlak. Om OTEC rendabel te maken is er minimaal een temperatuursverschil van circa 20° C nodig.

I.5.6 Magnetohydrodynamica

A. Methode

Bij magnetohydrodynamica stroomt er een geleidende vloeistof (bijvoorbeeld zeewater) door een magnetisch veld, waardoor er een elektrische stroom wordt opgewekt in de spoel.



Figuur I.16 Schematische weergave van magnetohydrodynamica (Neptune Systems) (Altran Technologies Netherlands BV, 2004)

In Nederland wordt op dit moment geen elektriciteit met magnetohydrodynamica opgewekt, wel is een patent op dit principe verkregen en bestaan er plannen voor een prototype. Voor magnetohydrodynamica is de Afsluitdijk niet benodigd. Integendeel: een locatie in ‘vrij’ water is meer geschikt, vanwege de getijdenstroming.

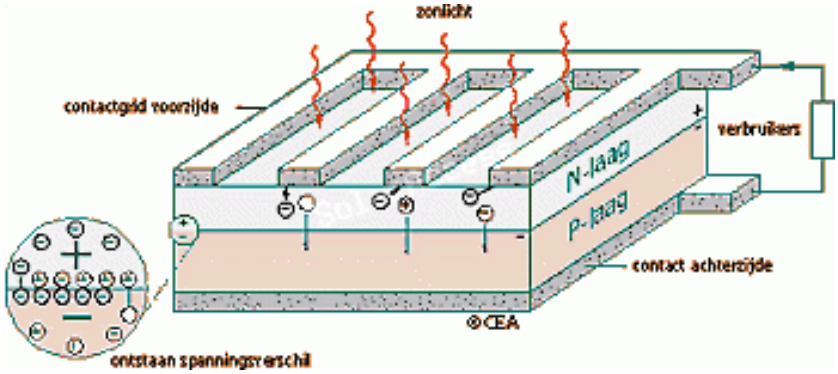
I.6 Zonne-energie

Zonne-energie is energie die de zon uitstraalt en de aarde bereikt als licht en warmtestraling (een mengsel van elektromagnetische straling van verschillende golflengten). Zonne-energie ontstaat uit kernfusie in de zon en is ook de indirecte bron voor vele andere vormen van energie. Zonne-energie wordt voor de mens een nuttige vorm van energie door zonlicht om te zetten in stroom (fotovoltaïsche zonne-energie), door zonlicht om te zetten in warmte (thermische zonne-energie).

I.6.1 Fotovoltaïsch

A. Methode

In een fotovoltaïsche cel (ofwel zonnecel) wordt energie uit licht (zonnestraling) direct omgezet in elektriciteit (zonnestroom), zonder tussenkomst van thermische of mechanische processen. Het fotovoltaïsche effect treedt op wanneer halfgeleidermateriaal, waarvan een deel positieve (de p-laag) en een ander deel negatieve (de n-laag) lading kan geleiden, blootgesteld wordt aan zonnestraling. Licht wordt geabsorbeerd in de zonnecel waardoor er lading wordt vrijgemaakt. Omdat zich op het overgangsgebied tussen de p- en de n-laag een selectieve ladingsbarrière bevindt, leidt het vrijmaken van lading tot de opbouw van een potentiaalverschil tussen voor- en achterzijde van de cel. Dit potentiaalverschil is de drijvende kracht achter de werking van de zonnecel. Door de twee lagen uitwendig met elkaar te verbinden, kan de lading zich verplaatsen, wat resulteert in een elektrische stroom: elektriciteit uit zonne-energie. (Menkveld, 2004)



Figuur I.17 Werking zonnecel (silicium) (Solar Access, 2007)

B. Algemene gegevens

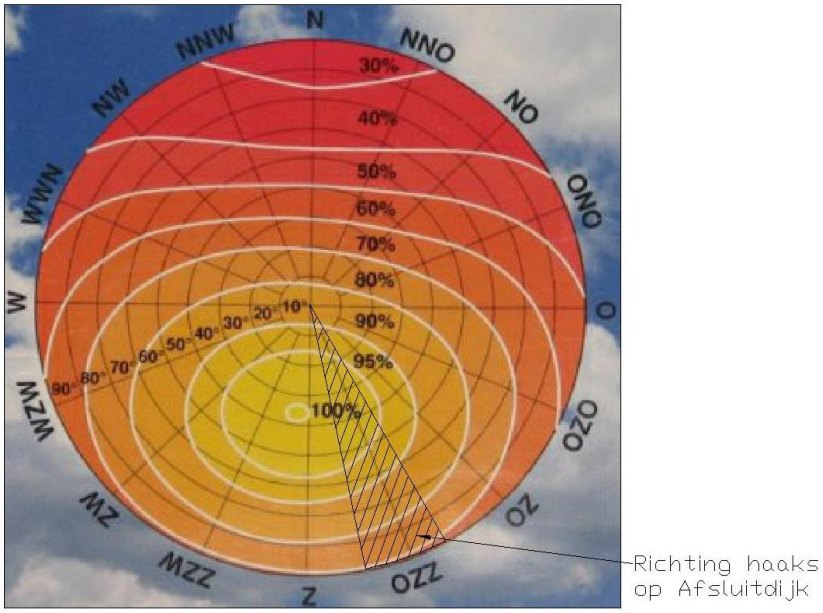
Zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen worden op dit moment niet veel op grote schaal toegepast. Wel worden vaak in kleine hoeveelheden toegepast zoals op daken van huizen en zijn er ook een aantal grote projecten tot stand gekomen in Nederland. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen autonome en netgekoppelde systemen. De ordegrootte van vermogen van de meeste systemen ligt tussen 0,5 en 2,5 kW. Op een aantal plaatsen zijn grotere systemen geplaatst waarvan het vermogen ligt tussen 2,5 en 10 kW. Totaal stond er in 2006 in Nederland circa 53 MW_p aan PV opgesteld.(International Energy Agency (IEA), 2007) Hiermee werd in 2006 circa 35 GWh aan elektriciteit opgewekt, wat neerkomt op een aandeel van 0,04% van de Nederlandse elektriciteitsproductie.(CBS) Het elektrisch rendement ligt tussen de 8% en 16%.(Holland Solar, 2007) Zie appendix I-E voor een overzicht van de huidige zonnestroomprojecten in Nederland. Hierbij dient opgemerkt te worden dat niet eenvoudig is een goed overzicht van het totaal aan Nederlandse zonnepanelensystemen te verkrijgen vanwege de grote hoeveelheid aan kleine zonnestroomprojecten in Nederland. Er zal daarom volstaan worden met een overzicht dat incompleet is.

C. *Toekomst*

Zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen zullen vaker toegepast worden, echter is dit wel afhankelijk van de kostprijs en de financieringsmogelijkheden. De overheid zal een belangrijke rol moeten vervullen om toename van het opwekken van elektriciteit middels zonnepanelen te bewerkstelligen: zolang zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen financieel niet aantrekkelijk zijn, zal de toepassing ervan relatief langzaam toenemen. De toepassing zal in de komende jaren voornamelijk op relatief kleine schaal (daken van huizen en bijvoorbeeld kantoren en bedrijven) plaatsvinden. In de verdere toekomst (2050) zullen ook meer zonnecentrales geplaatst worden.
Verder ontwikkelt de technologie zich steeds verder waardoor hogere rendementen haalbaar worden en een lagere kostprijs gerealiseerd kan worden. (International Energy Agency (IEA), 2007) (Holland Solar, 2005)

D. Toepassing Afsluitdijk

De Afsluitdijk is zeer geschikt voor toepassing van zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen aangezien de ligging van de dijk gunstig is (in het geval de panelen aan de zuidelijke zijde van de dijk geplaatst worden), waardoor er weinig rendementsverlies is. Figuur I.18 geeft weer hoeveel procent van de energie een zonnepaneel met fotovoltaïsche cellen maximaal uit de zonne-energie kan halen bij een bepaalde oriëntatie van het paneel. De met graden aangegeven cirkels stellen de helling van een paneel voor. Het zwart gearceerde gebied geeft de richting loodrecht op de Afsluitdijk weer.



Figuur I.18 Instralingsdiagram (Olino, 2007)

In Figuur I.18 is te zien dat bij een helling van ongeveer 18-52 graden (in het zwart gearceerde gebied) ten opzichte van de horizontaal 95% van de energie van de straling van de zon beschikbaar is voor het opwekken van elektriciteit met een fotovoltaïsche cel. Dit betekent bijvoorbeeld dat bij een fotovoltaïsche cel met een vermogen van 10 W in dit geval een vermogen van 9,5 W beschikbaar is.

Het potentieel voor de Afsluitdijk bedraagt circa 12,48 MW_p. Dit is gebaseerd op de plaatsing van zonnepanelen over de gehele lengte van de Afsluitdijk. Het oppervlak wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$A = L \cdot H \tag{I.5}$$

waarin:

A	=	oppervlak	[m^2]
L	=	lengte Afsluitdijk	[m]
H	=	hoogte zonnepanelen	[m]

met:

L	=	32.000 m	
H	=	3,9 m	

geeft dit:

$A = 32.000 \cdot 3,9 = 124.800\ m^2$

De berekening van het potentieel voor de Afsluitdijk wordt berekend met:

$$P_{Afsluitdijk} = A \cdot P_{gem} \qquad \text{(I.6)}$$

waarin:

$P_{Afsluitdijk}$	=	vermogen Afsluitdijk	[W]
A	=	oppervlak	[m^2]
P_{gem}	=	vermogen (gemiddeld) per eenheid van oppervlak	[W/m^2]

met:

A	=	124.800 m^2	
P_{gem}	=	100 W_p/m^2	

geeft dit:

$P_{Afsluitdijk} = 124.800 \cdot 100 = 12.480.000\ W_p = 12,48\ MW_p$

Zie appendix I voor een overzicht van het potentieel aan energie voor de Afsluitdijk.

E. *Voor- en nadelen*

Tot slot zullen de voor- en nadelen van elektriciteitsopwekking uit zonne-energie voor de Afsluitdijk nog worden gegeven:

+ Zonne-energie is een onuitputtelijke bron.
+ Het is een duurzame vorm van elektriciteitsopwekking, aangezien bij het opwekken van elektriciteit bijvoorbeeld geen brandstoffen worden gebruikt.
+ Het is een betrouwbare methode van elektriciteitsopwekking doordat het aanbod van zonkracht redelijk voorspelbaar en de methode redelijk goed ontwikkeld is.
+ Het opwekken van elektriciteit met zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen vindt plaats zonder schadelijke uitstoot en afval, echter dient wel rekening gehouden te worden met uitstoot en het gebruik van chemicaliën bij het fabriceren van een zonnepaneel.
+ Er zal nagenoeg geen aantasting van de leefomgeving en ecologisch waardevolle gebieden plaatsvinden.
+ Fotovoltaïsche panelen zullen nagenoeg geen negatieve invloed hebben op de fauna (hoogstens door weerkaatsend zonlicht).
+ De realisatietijd bij toepassing van zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen zal kort zijn.
− Vanwege het relatief geringe aanbod aan zonkracht en (nog) geen (grote) aanwezige energieopslagmogelijkheden in Nederland zal de opwekking van elektriciteit met zonnestroomcentrales niet kunnen dienen als vervanging van traditionele centrales.

- Het verschil tussen zonkracht in de zomer en winter kan in Nederland niet goed benut worden door gebrek aan opslagmogelijkheden.
- Het elektrisch rendement van een zonnepaneel met fotovoltaïsche cellen ligt vrij laag (tussen 8% en 16%).
- Het potentieel voor de Afsluitdijk is in vergelijking tot andere duurzame methoden van energieconversie niet erg hoog (P = 12,48 MW_P).
- De terugverdientijd op zowel energetisch als economisch vlak zal van langere duur zijn, vanwege het relatief lagere vermogen en de hoge kostprijs van zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen.
- De levensduur van een zonnepaneel bedraagt gemiddeld 20 tot 25 jaar.
- De kosten van zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen zijn relatief hoog. De investeringskosten voor een zonnestroomcentrale op de Afsluitdijk bedragen ongeveer 4 miljoen euro per kilometer Afsluitdijk, wat totaal neerkomt op ongeveer 128 miljoen euro.(The Sun Factory, 2003)
- Om een groot vermogen te kunnen realiseren dient een groot oppervlak aan zonnepanelen met fotovoltaïsche cellen geplaatst te worden waar veel ruimte voor benodigd is.

I.6.2 Thermisch

Bij thermische zonne-energie wordt door collectoren warmte uit zonlicht gehaald (elektromagnetische straling), welke vervolgens kan worden gebruikt als proceswarmte, voor het verwarmen van ruimtes of tapwater.
In Nederland wordt thermische zonne-energie gebruikt, maar wel op kleine schaal. De toepassing is vaak te vinden in zonnecollectoren die op woonhuizen zijn geplaatst, waarmee huishoudelijk warm water wordt verkregen. Elektriciteit wordt er niet mee opgewekt.
Thermische zonne-energie is niet interessant voor toepassing op de Afsluitdijk vanwege de afgelegen locatie van de Afsluitdijk. De warmte dient eerst getransporteerd te worden naar bewoond gebied met als gevolg optredende verliezen.
Bovendien is thermische zonne-energie geen methode van elektriciteitsproductie, waardoor deze methode afvalt.

I.6.3 Thermisch-elektrisch

Bij thermisch-elektrische zonne-energie wordt door spiegels of lenzen het zonlicht geconcentreerd waarmee in een receptor een vloeistof verhit wordt.
In Nederland wordt deze technologie niet gebruikt aangezien gemiddeld 60% van het zonlicht uit diffuus licht bestaat. Het diffuse deel van het zonlicht (dat deel van het licht dat verstrooid is door wolken en deeltjes in de atmosfeer) valt niet te concentreren, waardoor deze methode niet interessant is voor toepassing in Nederland.

I.7 Windenergie

Windenergie is de energie die gewonnen wordt door bewegingsenergie (van luchtdeeltjes) om te zetten in elektrische energie met mechanische energie of elektrostatische energie als tussenstap.
Windenergie is indirect een vorm van zonne-energie: de zonnewarmte op aarde veroorzaakt temperatuurverschillen en daardoor luchtdrukverschillen met als gevolg wind. Windenergie kan via een mechanische of elektrostatische methode in een voor de mens nuttige vorm van energie worden omgezet.

I.7.1 Mechanisch

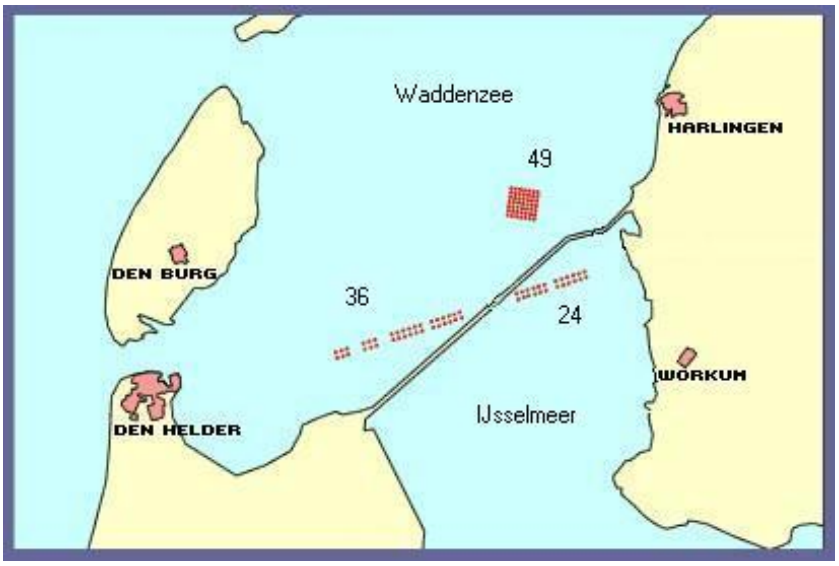
A. Methode
In het geval van mechanische windenergie wordt bewegingsenergie in mechanische energie omgezet wat met een turbine tot de opwekking van elektriciteit leidt.

B. Algemene gegevens
In Nederland (vaste land en Noordzee) staan op dit moment 1.888 windturbines. De ordegrootte van deze windturbines loopt tot ongeveer 4,5 MW. Het totale vermogen aan windturbines in Nederland bedraagt circa 1.747 MW. Deze windturbines leverden in 2006 2.733 GWh (op basis van een 100% windjaar) aan elektriciteit, wat neerkomt op een aandeel van 2,77% van de Nederlandse elektriciteitsproductie. (CBS) (Wind Service Holland, 2007a)Het elektrisch rendement ligt ongeveer tussen 10% en 40%.
Zie appendix I-F voor een overzicht van de huidige windenergiecentrales in Nederland.

C. *Toekomst*
De markt voor windenergie is groeiend en het aantal windturbines in Nederland zal alleen maar toenemen. Wel zijn er op veel geschikte locaties al windturbines geplaatst, waardoor er ook uitgeweken zal worden naar de Noordzee. Een andere reden is dat op de Noordzee hogere rendementen haalbaar zijn dan boven land vanwege een gunstiger windaanbod.(Transitieplatform Duurzame Energievoorziening, 2006) Wel blijft het maximum rendement van 59% (Betz-limiet) van toepassing.
Zie appendix I-G voor een overzicht van de geplande windenergiecentrales in Nederland.

D. Toepassing Afsluitdijk
Na het voorgaande kan worden vastgesteld dat de Afsluitdijk één van de betere plaatsen geschikt voor toepassing van windturbines is. In het verleden is deze optie bekeken en is door weerstand van natuurorganisaties afgewezen.

Het potentieel voor de Afsluitdijk bedraagt circa 278 MW_p. Dit is gebaseerd op het Interprovinciaal Project Windturbines Afsluitdijk (IPWA). Zie Figuur I.19 voor een overzicht van het plan om 109 windturbines nabij de Afsluitdijk te plaatsen.(Wind Service Holland, 2007b)



Figuur I.19 Locatie en aantal windturbines nabij de Afsluitdijk (Wind Service Holland, 2007b)

Verder is de Afsluitdijk niet benodigd voor het realiseren van een windturbinepark. Dit zou namelijk ook zonder Afsluitdijk gerealiseerd kunnen worden.

Zie appendix I voor een overzicht van het potentieel aan energie voor de Afsluitdijk.

E. *Voor- en nadelen*

Tot slot zullen de voor- en nadelen van elektriciteitsopwekking uit mechanische windenergie voor de Afsluitdijk nog worden gegeven:

+ Wind is een onuitputtelijke bron.
+ Het is een duurzame vorm van elektriciteitsopwekking, aangezien bij het opwekken van elektriciteit bijvoorbeeld geen brandstoffen worden gebruikt.
+ Het elektrisch rendement van een windturbine ligt niet heel erg hoog, maar is ook niet laag (tussen 10% en 40%).
+ Het is een redelijk betrouwbare methode van elektriciteitsopwekking. Het aanbod van wind is niet goed voorspelbaar, maar de gemiddelde jaaropbrengst is dat wel wat windenergie voorspelbaarder maakt. Verder is de methode goed ontwikkeld.
+ Het potentieel bij de Afsluitdijk is in vergelijking tot andere duurzame methoden van energieconversie vrij hoog (P = 278 MW_P).
+ De realisatietijd bij toepassing van windturbines nabij de Afsluitdijk zal kort zijn.
+ De terugverdientijd op zowel energetisch (3 tot 6 maanden [afhankelijk van windaanbod]) als economisch vlak zal van korte duur zijn.
+ De levensduur van een windturbine bedraagt gemiddeld 15 tot 20 jaar(Wind Service Holland, 2008).
+ Het opwekken van elektriciteit uit windenergie vindt plaats zonder schadelijke uitstoot en afval, echter dient wel rekening te worden gehouden met uitstoot bij het bouwen van bijvoorbeeld een windturbine.
+ De kosten van elektriciteit uit wind zijn sterk afhankelijk van de locatie. Voor de toepassing van 109 windturbines bij de Afsluitdijk bedragen de kosten ongeveer 167 miljoen euro.
− Vanwege de afhankelijkheid van wind zal de opwekking van elektriciteit uit windenergie niet kunnen dienen als vervanging van traditionele centrales. Bij een groot leveringsaandeel van windenergie in het Nederlandse elektriciteitsgebruik, zal er energie opgeslagen dienen te worden als back-up.
− Er kan een mogelijke aantasting van de leefomgeving en ecologisch waardevolle gebieden plaatsvinden.

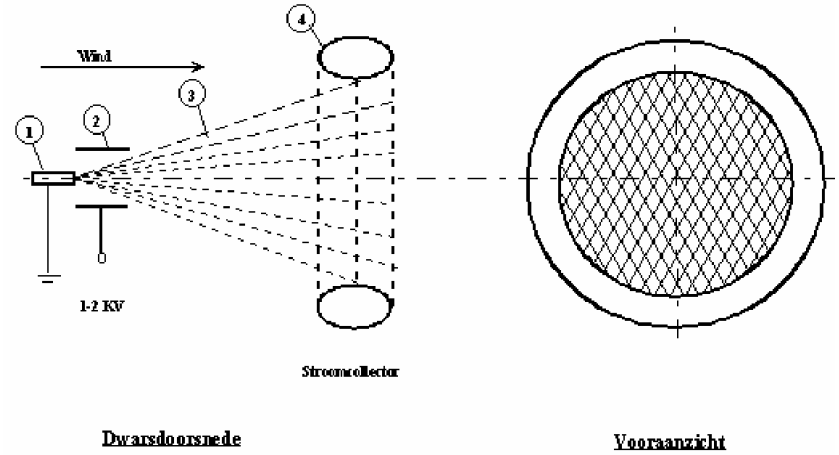
- Elektriciteit opgewekt uit wind kan een geringe negatieve invloed hebben op de fauna (bijvoorbeeld vogelsterfte).
- Elektriciteit opgewekt met de mechanische methode geeft horizonvervuiling, geluidsoverlast en slagschaduw.

I.7.2 Elektrostatisch

Bij elektrostatische windenergie wordt elektriciteit opgewekt met door de wind meegevoerde elektrisch geladen deeltjes. Het afremmen van deze deeltjes levert elektriciteit op.

A. Methode

Bij elektrostatische windenergie wordt water verneveld waarbij de neveldruppeltjes een elektrische lading meekrijgen. De geladen deeltjes worden met de wind in een nevel meegevoerd. De lading wordt opgevangen met een rooster. Door de geladen nevel wordt het rooster op een hoge spanning gebracht, wat meer energie levert dan het kost om de deeltjes op te laden. (Balendonck, et al., 2007)



Figuur I.20 Principe van EWICON (Balendonck, et al., 2007)

B. Algemene gegevens

In Nederland wordt elektrostatische windenergie nog niet toegepast. De technologie is nog in ontwikkeling en er zijn testen uitgevoerd met een prototype op laboratoriumschaal van 1 kW. De rendementen zijn momenteel nog laag(Balendonck, et al., 2007). Het maximum rendement van elektrostatische windenergie is gelijk aan het theoretisch maximum haalbaar rendement van windturbines: 59% (Betz-limiet). (Sonneveld, et al., 2003)

C. *Toekomst*

Het ziet er niet direct naar uit dat elektrostatische windenergie op korte termijn commercieel beschikbaar zal worden. Er zal nog onderzoek gedaan moeten worden voor optimalisatie, waarna schaalvergroting nog plaats dient te vinden. Verder blijkt uit een kostprijsberekening dat het EWICON principe momenteel nog duurder is dan windturbines. EWICON is zowel op het land als op zee toepasbaar. (Sonneveld, et al., 2003)

D. Toepassing Afsluitdijk

Voor de toepassing van elektrostatische windenergie voor de Afsluitdijk wordt verwezen naar 'Mechanische energie'.

E. *Voor- en nadelen*

De voor- en nadelen van elektriciteitsopwekking met elektrostatische windenergie voor de Afsluitdijk is op vele punten hetzelfde als bij mechanische windenergie. Verschillen en toevoegingen zijn:

+ Geen bewegende delen, wat minder onderhoud vraagt en nagenoeg geruisloos werkt.
- De kosten zijn hoger dan de kosten voor windturbines.

- Laag rendement (op dit moment; na verdere ontwikkeling zijn hogere rendementen mogelijk).
- De technologie is nog niet goed ontwikkeld.

I.8 Aardwarmte

Geothermische energie, ofwel aardwarmte (ontstaat door radioactief verval in de aardkorst), is energie die wordt gewonnen door gebruik te maken van het temperatuurverschil tussen de aardoppervlakte en diep in de aarde gelegen warmtereservoirs. Deze vorm van energie kan direct worden gebruikt of met turbines worden omgezet in een voor de mens nuttige vorm van energie.
In Nederland wordt geen gebruik gemaakt van aardwarmte als bron voor de opwekking van elektriciteit. Wel zijn er plannen om aardwarmte te gaan gebruiken als warmtebron, maar niet voor de opwekking van elektriciteit. Nederland beschikt alleen over laagenthalpievindplaatsen, waarbij de temperatuur onder het oosten van Friesland het hoogst is (ongeveer 95 graden Celsius). Met de relatief lage temperaturen die in Nederland worden aangetroffen is het waarschijnlijk niet mogelijk om elektriciteit op te wekken uit aardwarmte (waarvoor meer dan 150 graden Celsius benodigd is).

I.9 Conclusie

I.9.1 Algemeen

Methoden van duurzame energieconversie worden steeds rendabeler, zowel op energetisch als economisch vlak. Door de ontwikkelingen in de verschillende technologieën worden de elektrische rendementen steeds hoger. De alsmaar stijgende olieprijs zorgt ervoor dat de kostprijs voor duurzaam opgewekte elektriciteit steeds meer concurrerender wordt (of al lager is) ten opzichte van elektriciteit opgewekt in traditionele elektriciteitscentrales (aangedreven door bijvoorbeeld fossiele brandstoffen).

Er valt op dat er niet direct een vervanger is voor de traditionele elektriciteitscentrales in Nederland, door een gebrek aan opslagcapaciteit. De oplossing voor vervanging zal gevonden moeten worden in de toepassing van verschillende methoden van elektriciteitsopwekking op kleine en grote schaal. Ook de mogelijkheden voor opwekking van elektriciteit in bijvoorbeeld Afrika (Sahara) zijn interessante opties. Zeker gezien de ruimte en straling van de zon die daar de aarde bereikt. Echter valt onderzoek hiernaar buiten het kader van dit afstudeerproject.

I.9.2 De Afsluitdijk

Kijkend naar de Afsluitdijk kan er gesteld worden dat er verschillende mogelijkheden zijn om deze te gebruiken als middel om elektriciteit uit de verschillende vormen van energie te halen.
De kracht van de Afsluitdijk is vooral te vinden in de volgende punten:

- Grens tussen zoet en zout water
  De Afsluitdijk vormt een ‘harde’ grens tussen zoet en zout water, waarbij geldt dat het zoete en zoute water in grote hoeveelheden aanwezig is.
- Vrije ligging van de Afsluitdijk
  De vrije ligging van de Afsluitdijk zorgt voor ruimte en mogelijkheden voor toepassing van (duurzame) energieconversie. Te denken valt aan een goede toegankelijkheid van de aanwezige energiebronnen en zal weinig overlast veroorzaken aangezien het geen stedelijk gebied betreft.
- Toeristische trekpleister
  De Afsluitdijk is een toeristische trekpleister en is internationaal bekend. Dit kan interessant zijn voor investeerders.
- Geometrie Afsluitdijk
  De Afsluitdijk is een, in lengterichting, rechte dijk van enkele tientallen kilometers lang. Dit biedt ruimte voor toepassing van (duurzame) energieconversie.

I.9.3 Multicriteria analyse

Deze conclusie is gebaseerd op een multicriteria analyse waarbij per energieconversiemethode een waardeoordeel is gegeven. De multicriteria analyse zal worden gebruikt als hulpmiddel bij het verkrijgen van een goed beeld van de mogelijkheden voor duurzame energieconversie in combinatie met de Afsluitdijk. De criteria waarop iedere methode is beoordeeld zijn:

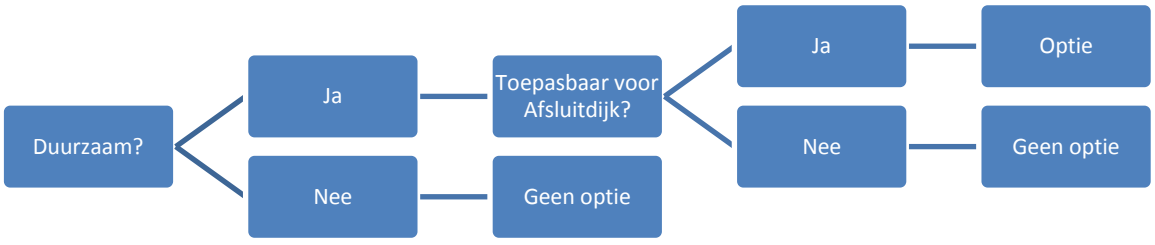
1. Duurzaamheid
   Voor iedere methode is beoordeeld in welke mate deze duurzaam is. Het begrip duurzaam heeft dezelfde definitie als gedefinieerd als in paragraaf I.1.4.1. Er is bij de beoordeling voornamelijk bekeken of de energiebron hernieuwbaar is en of een methode al dan niet vervuilend is tijdens fabricage, installatie, elektriciteitsproductie, onderhoud en na het verstrijken van de levensduur. Duurzamere methoden zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
2. Toepasbaarheid Afsluitdijk
   De methoden zijn ook beoordeeld op toepasbaarheid voor de Afsluitdijk, waarbij is gekeken welke werkzaamheden en aanpassingen verricht dienen te worden voor realisering van een methode. Methoden met kleinschaligere werkzaamheden en een lagere mate van aanpassing zullen een hogere score toebedeeld krijgen.

3. Vermogen
   Er is per methode bekeken welk vermogen beschikbaar zal worden, waarbij in het oordeel is meegenomen of de cijfers zijn gebaseerd op huidige resultaten of schattingen voor de toekomst. Methoden met een groter beschikbaar vermogen gebaseerd op huidige resultaten zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
4. Jaarlijkse productie
   De jaarlijkse productie is per methode beschouwd en beoordeeld. Bij de beoordeling hiervan is niet alleen de hoeveelheid bekeken, maar ook de beschikbaarheid van de bron voor de methode. Verder is in het oordeel meegenomen of er een grote fluctuatie in de waarden aanwezig is. Methoden met een hogere jaarlijkse productie zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
5. Elektrisch rendement
   Voor iedere methode is het elektrisch rendement beschouwd en beoordeeld. Er is hierbij niet alleen de hoogte van het elektrisch rendement bekeken, maar ook in welke mate dit afhankelijk is van bijvoorbeeld de energiebron (zoals bij mechanische windenergie). Methoden met een hoger elektrisch rendement zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
6. Flora en fauna
   De gevolgen voor flora en fauna zijn per methode bekeken en beoordeeld. Er is hiervoor gekeken naar de mogelijke veranderingen en positieve of negatieve invloeden op flora en fauna. Methoden met een gunstigere uitwerking zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
7. Inpassing in landschap
   De inpassing van een methode in het landschap is beschouwd en beoordeeld. Methoden die beter in het landschap en bijvoorbeeld minder voor horizonvervuiling zorgen, zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
8. Projectkosten
   Per methode is de hoogte van de (geschatte) projectkosten bekeken (voor zover bekend). Methoden waaraan lagere kosten zijn verbonden zullen een hogere score toebedeeld krijgen.
9. Realisatietijd
   Tot slot is bekeken of de realisatietijden lang of kort zijn. Er wordt hier gesproken over ‘realisatietijden’ aangezien er per methode verschillende mogelijkheden (energieomzetters) zijn. Methoden met kortere realisatietijden zullen een hogere score toebedeeld krijgen.

De criteria die voor dit project van groot belang worden geacht zijn: 1, 2, 3, 4, 8 en 9. De overige criteria zijn ook van belang, maar in mindere mate.

Opmerking: Het is mogelijk een factor toe te kennen aan een aantal criteria, waardoor sommige criteria een grotere invloed zullen krijgen op de totaalscore. Er is voor dit project gekozen dit niet toe te passen aangezien de multicriteria analyse alleen als hulpmiddel wordt gebruikt bij het verkrijgen van een goed beeld van de mogelijkheden voor duurzame energieconversie in combinatie met de Afsluitdijk.

Voor de beoordeling van een methode is allereerst gekeken of een methode überhaupt wel aan de eisen ‘duurzaam’ en ‘toepasbaar voor de Afsluitdijk’ voldeed. Bij het bepalen voor minimum eisen voor kans van toepassing voor een bepaalde methode is het volgende keuzeschema gebruikt:



Figuur I.21 Stroomschema voor minimum eisen voor kans van toepassing

In Tabel I.3 zijn de resultaten van de multicriteria analyse weergegeven.

Tabel I.3 Multicriteria analyse voor de verschillende methoden van duurzame energieconversie

			duurzaamheid									
				toepasbaarheid Afsluitdijk								
					vermogen							
						jaarlijkse productie						
							elektrisch rendement					
								flora en fauna				
									Inpassing in landschap			
										projectkosten		
											realisatietijd	
methode	**subdivisie**	**toepassing**										**totaal**
water												
waterkracht	-	waterkrachtcentrale	2	2	1	1	2	1	2	2	2	**15**
getijden	getijverschil	getijdencentrale	2	0	2	2	2	1	1	-2	0	**8**
	getijdenstroming	turbines	2	-	1	1	*	1	2	*	*	**7**
golfslag	-	convertor	2	-	1	*	1	2	2	*	*	**8**
zoutgradiënt	PRO	osmosecentrale	2	2	2	2	*	1	1	-1	-2	**7**
	RED	osmosecentrale	2	2	2	2	1	1	1	-1	-2	**8**
zonne-energie												
zonnestroom	-	fotovoltaïsche cellen	2	2	1	1	1	2	1	0	2	**12**
wind												
mechanisch	-	turbines	2	1	2	2	1	1	-2	0	2	**9**
elektrostatisch	-	EWICON	2	1	*	*	*	1	-2	*	-2	**0**

legenda:

oordeel	**score**
zeer negatief	-2
negatief	-1
neutraal	0
positief	1
zeer positief	2
*	onbekend
-	niet van toepassing

Opmerking: Voor de methoden ‘Getijden’ (turbines) en ‘Golfslag’ (in de groep ‘Water’) is het criterium ‘Toepasbaarheid Afsluitdijk’ niet van toepassing aangezien de Afsluitdijk voor deze methoden niet benodigd is. Deze gedachte zou ook voor de methoden ‘Mechanisch’ en ‘Elektrostatisch’ (in de groep ‘Wind’) van toepassing kunnen zijn, echter is hier gekozen om deze wel te beoordelen met een score omdat deze methoden ook op de Afsluitdijk toepasbaar zijn.

I.9.4 Eindoordeel

Tot slot het eindoordeel met daarin de meest gunstige optie gelet op de eisen en criteria.

Kijkend naar de score kan vastgesteld worden dat de methode ‘Waterkracht’ de hoogste score heeft. Deze hoge score zal hieronder verklaard en dient wel enigszins genuanceerd te worden.
De hoge score voor waterkracht wordt veroorzaakt door de goede toepasbaarheid voor de Afsluitdijk. Dit geldt voor zowel turbines in de huidige spuisluizen als turbines in de nieuw te bouwen spuisluizen.
Verder zorgt een hoog rendement voor de hoge score. Dit hoge rendement is alleen van toepassing in het geval turbines worden toegepast op dezelfde manier als in een riviercentrale. Turbines geplaatst in de huidige spuisluizen hebben een lager rendement.

De lage projectkosten zijn van toepassing voor het geval turbines in de huidige spuisluizen worden geplaatst. In het geval van turbines in nieuw te bouwen spuisluizen zullen de kosten hoogstwaarschijnlijk hoger uitvallen, welke wel gecombineerd kunnen worden met de bouwkosten voor de nieuwe spuisluizen.
Voor de realisatietijd van waterkracht is ook een hoge score toegekend wat is gebaseerd op de plaatsing van turbines in de huidige spuisluizen (wordt momenteel al getest). De bouw van nieuwe spuisluizen neemt echter een veel langere tijd in beslag. De technologie die gebruikt wordt bij waterkracht is goed ontwikkeld, wat snelle toepassing ten goede komt.
Het is wel belangrijk niet te vergeten dat de zeewaterspiegel stijgt en dat er steeds minder energie gewonnen kan worden uit waterkracht (spuien). In de toekomst zal zelfs energie toegevoegd moeten worden om water van het IJsselmeer naar de Waddenzee te kunnen 'spuien'.

Een andere methode met een hoge score is zonnestroom, met dezelfde verklaring als waterkracht voor de criteria 'toepasbaarheid Afsluitdijk'. De realisatietijd van zonnestroom is relatief kort en het is redelijk goed ontwikkelde methode wat een snelle realisatie mogelijk maakt.
Het elektrisch rendement van zonnestroom is lager dan het elektrisch rendement bij waterkracht.
De projectkosten voor zonnestroom zijn vele malen hoger dan de kosten voor waterkracht (turbines in huidige spuisluizen).

Mechanische windenergie is ook een goede optie (groot vermogen en relatief korte realisatietijd), echter zijn hier in het verleden ook al plannen (IPWA) voor geweest welke door natuurorganisaties zijn afgewezen waardoor het project niet gerealiseerd kon worden. Ook nu zal windenergie bij de Afsluitdijk om voorgenoemde reden geen optie zijn.

Energie uit getijverschil is een goede, maar economische onrendabele optie (op dit moment). De reden hiervoor is het hoge elektrische vermogen en het hoge elektrisch rendement, waar hoge projectkosten tegenover staan. Deze methode is goed toepasbaar in combinatie met de Afsluitdijk, echter dienen er wel veel werkzaamheden en aanpassingen verricht te worden (zoals het aanlegen van een ringdijk in het IJsselmeer). Daardoor stijgen de kosten ook aanzienlijk en zijn deze vele malen hoger dan andere methoden.

Energie uit getijdenstroming is voor toepassing in combinatie met de Afsluitdijk geen optie. De reden hiervoor is dat de Afsluitdijk niet benodigd is voor het opwekken van elektriciteit uit getijdenstroming.

Golfslagenergie is niet rendabel om ter plaatse van de Afsluitdijk elektriciteit mee op te wekken door het lage potentieel aan golfslagenergie in de Waddenzee. Daar komt nog bij dat veel van de methoden voor energieconversie uit golfslag in ontwikkeling zijn en nog niet op grote schaal worden toegepast. Dit alles zorgt ervoor dat deze methode afvalt.

Energie uit een zoutgradiënt is zeer goed toepasbaar voor de Afsluitdijk aangezien deze dam de scheiding vormt tussen zoet en zout water en beiden in grote hoeveelheden aanwezig zijn. Echter is het zo dat de wetenschappelijke voorspellingen voor grootschalige toepassingen nog wel aangetoond dienen te worden door nader onderzoek en toepassing op grotere schaal. Hierdoor valt deze methode af als optie voor toepassing voor de Afsluitdijk.

Elektrostatische windenergie is nog in ontwikkeling en ziet er veel belovend uit, echter dienen de wetenschappelijke voorspellingen nog wel aangetoond te worden met prototypes en verder onderzoek. Hierdoor valt ook deze methode af als optie voor toepassing voor de Afsluitdijk.

Alle methoden zijn duurzaam en vele methoden zijn toepasbaar in combinatie met de Afsluitdijk, maar de methoden welke haalbaar geacht worden voor toepassing (gerangschikt naar criteria) zijn:

- Als er gekozen wordt op basis van snelle realisatietijd komen zonnestroom en waterkracht (turbines in de huidige spuisluizen) als beste methoden in aanmerking.
- Als er gekozen wordt op basis van vermogen komt energie uit getijverschil als beste methode in aanmerking.
- Als er gekozen wordt op basis van projectkosten komt waterkracht (turbines in de huidige spuisluizen) als beste methode in aanmerking.

I.10 Appendix I-A: Schema energieconversie

Tabel I.4 Schema energieconversie

primaire energie-bronnen		eerste conversie	eerste opslag	tussen-conversie	tweede opslag	eindgebruik
sterke kernkracht: kernfusie van lichte elementen	natuurlijke kernfusie in de zon: zonnestraling	natuurlijke fotosynthese (groene planten) [1] (conversie naar chemische energie)	koolwaterstoffen (via biomassa uit voorgaande tijdperken) [2]	verbranding	n.v.t.	verwarming mechanische energie elektrische energie
			biomassa	voeding (bio)chemische omzetting	vetweefsel	mechanische energie (spierarbeid)
				verbranding	n.v.t.	mechanische energie elektrische energie
				(bio)chemische omzetting	biobrandstoffen (waterstof, kool-waterstoffen)	mechanische energie elektrische energie
		kunstmatige fotosynthese en fotolyse (conversie naar chemische energie)	waterstofgas, koolwaterstoffen	verbranding	n.v.t.	verwarming mechanische energie elektrische energie
				elektrochemische omzetting	n.v.t.	elektrische energie
		fotovoltaïsche conversie (conversie naar elektrische energie)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	elektrische energie
		verdamping van water en stijging van waterdamp (conversie naar potentiële energie)	neerslag op hoger gelegen plaatsen [3]	van potentiële in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
			verschil in zoutconcentratie van zoet en zout water [4]	van (chemische) potentiële in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
		conversie naar thermische energie (lage temperatuur)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	thermische energie
		conversie naar thermische energie (hoge temperatuur, via concentratoren)	warmteopslag (water, stoom, zout, gesmolten metaal)	n.v.t.	waterstofgas	elektrische energie
				van thermische in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
		(ongelijkmatige) verwarming van atmosfeer [5], oceanen en ladmassa's (conversie naar potentiële en kinetische energie)	wind	van kinetische in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
				van kinetische in mechanische energie	n.v.t.	mechanische energie
				van kinetische in potentiële energie	hoger gelegen bassin [3]	elektrische energie
			golven	van potentiële en kinetische in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
			horizontale en verticale tempe-ratuurgradiënten in oceanen	van kinetische in elektrische energie (oceaanstromingen)	n.v.t.	elektrische energie
				van thermische in elektrische energie (OTEC) [6]	n.v.t.	elektrische energie
	kunstmatige kernfusie	conversie naar thermische energie	warmteopslag (water, stoom, zout, gesmolten metaal)	n.v.t.	n.v.t.	elektrische energie

Vervolg van Tabel I.4

primaire energie-bronnen		eerste conversie	eerste opslag	tussen-conversie	tweede opslag	eindgebruik
sterke kernkracht: kern-splijting van zware elementen	kunstmatige kernsplijting [7]	conversie naar thermische energie	warmteopslag (water, stoom, zout, gesmolten metaal)	van thermische in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
zwakke kernkracht	natuurlijk verval	conversie naar thermische energie	aardwarmte	van thermische in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie
				n.v.t.	n.v.t.	verwarming
zwaartekracht	getijden [8]	n.v.t.	n.v.t.	van potentiële en kinetische in elektrische energie	n.v.t.	elektrische energie

Toelichting bij Tabel I.4

De tabel geeft schematisch weer langs welke wegen energie uit primaire energiebronnen gebruikers kan bereiken. Hierbij worden verschillende vormen van energie in elkaar omgezet (geconverteerd).

Noten:

1. Natuurlijke fotosynthese (kolom 3, rij 1 tot en met 4) levert momenteel ongeveer 92 % van alle gebruikte energie (bron: UT diesrede 2000 door van Swaaij).
2. Koolwaterstoffen (kolom 4, rij 1): turf, steenkool, aardolie, aardgas, teerzanden, hydraten.
3. Het zwaartekrachtsveld van de aarde veroorzaakt dat materie op hoger gelegen plaatsen arbeid kan verrichten en dus potentiële energie bezit (kolom 4, rij 8).
4. Verschil in zoutconcentratie (kolom 4, rij 9) kan een elektrisch potentiaalverschil over een membraan opleveren.
5. Ongelijkmatige opwarming van de atmosfeer (kolom 3, rij 13) veroorzaakt naast wind, golven en temperatuurgradiënten ook bliksem; er is vooralsnog echter geen opslag en praktisch gebruik bekend van de in bliksem bevatte energie.
6. OTEC (kolom 5, rij 18): OTEC: ocean thermal energy conversion.
7. Bij kernsplijting (rij 20) blijft spontane kernsplijting buiten beschouwing.
8. De getijdenbeweging van zeewater (onderste rij) wordt langs twee wegen, rechtstreeks én indirect, veroorzaakt door de zwaartekracht. De maan en de zon oefenen (direct) een aantrekkende kracht uit op de aardkorst en het zeewater. De zwaartekracht houdt tevens de rotatie van aarde en maan rond hun gemeenschappelijke zwaartepunt in stand. De middelpuntzoekende kracht die bij deze rotatie een rol speelt, vormt ook een oorzaak voor de getijdenbeweging. Langs beide wegen wordt zowel het zeewater als de vaste aardkorst in een periodieke beweging gebracht. Het zeewater ondervindt daarbij minder weerstand dan de vaste aardkorst, wat leidt tot regelmatig wisselende hoogteverschillen van het zeewater en vandaar tot getijdenstromingen.

I.11 Appendix I-B: Overzicht huidige gas-/kolen-/kernenergiecentrales Nederland

Tabel I.5 Huidige gasgestookte energiecentrales in Nederland

source	company	location	unit	number of factories (pcs)	electrical power (MW_p)	output
gas						
blast furnace gas	NUON	IJmuiden	IJmuiden1	1	145	electricity
	NUON	Velsen	Velsen-24	1	459	electricity
	NUON	Velsen	Velsen-25	1	360	electricity
natural gas	Delta	Borssele	Borssele-20	1	18	electricity
	Delta	Terneuzen	Elsta	1	430	electricity + heat
	E.ON	Capelle a/d IJssel	ROCA-1	1	24	electricity + heat
	E.ON	Capelle a/d IJssel	ROCA-2	1	25	electricity + heat
	E.ON	Capelle a/d IJssel	ROCA-3	1	220	electricity + heat
	E.ON	Delft	Delft GT1	1	24	electricity
	E.ON	Delft	Delft GT2	1	23	electricity
	E.ON	Delft	Delft GT3	1	23	electricity
	E.ON	Delft	Delft GT4	1	23	electricity
	E.ON	Den Haag	Den Haag GV-15	1	78	electricity + heat
	E.ON	Leiden	Leiden LD-12	1	81	electricity + heat
	E.ON	Rotterdam	Gallilei-1	1	209	electricity + heat
	E.ON	Rotterdam	UCML	1	80	electricity + heat
	Electrabel	Almere	Almere-1	1	67	electricity + heat
	Electrabel	Almere	Almere-2	1	53	electricity + heat
	Electrabel	Bergum	Bergum-10	1	332	electricity
	Electrabel	Bergum	Bergum-20	1	332	electricity
	Electrabel	Delfzijl	Eems-20	1	695	electricity
	Electrabel	Delfzijl	Eems-30	1	341	electricity
	Electrabel	Delfzijl	Eems-40	1	341	electricity
	Electrabel	Delfzijl	Eems-50	1	341	electricity
	Electrabel	Delfzijl	Eems-60	1	341	electricity
	Electrabel	Delfzijl	Eems-70	1	341	electricity
	Electrabel	Harculo	Harculo-60	1	350	electricity
	Electrabel	Lelystad	Flevo-30	1	124	electricity
	Electrabel	Rotterdam	Air products	1	43	electricity + heat
	ENECO	Rotterdam	Rijnmond Energie	1	820	electricity + heat
	Essent	Geertruidenberg	Donge-1	1	121	electricity
	Essent	Geleen	Swentibold-1	1	190	electricity
	Essent	Maasbracht	Maasbracht-A (Claus)	1	640	electricity
	Essent	Maasbracht	Maasbracht-B (Claus)	1	640	electricity
	Essent	Moerdijk	Moerdijk-1	1	339	electricity + heat
	NUON	Amsterdam	Hemweg-7	1	599	electricity
	NUON	Diemen	Diemen-33	1	249	electricity + heat
	NUON	Purmerend	Purmerend-1	1	69	electricity + heat
	NUON	Utrecht	Lage Weide-6	1	247	electricity + heat
	NUON	Utrecht	Merwede-10	1	96	electricity + heat
	NUON	Utrecht	Merwede-11	1	103	electricity + heat
	NUON	Utrecht	Merwede-12	1	217	electricity + heat
	NUON	Velsen	Velsen-GT1	1	26	electricity
subtotal				**43**	**10.279**	

Tabel I.6 Huidige kolengestookte (inclusief biomassa) en kernenergiecentrales in Nederland (vervolg van Tabel I.5)

source	company	location	unit	number of factories (pcs)	electrical power (MW_p)	output
coal (incl. biomass)						
coal	NUON	Amsterdam	Hemweg-8	1	630	electricity
coal + biomass	Delta	Borssele	Borssele-12	1	406	electricity
	E.ON	Rotterdam	Maasvlakte-1	1	520	electricity
	E.ON	Rotterdam	Maasvlakte-2	1	520	electricity
	Electrabel	Nijmegen	Gelderland-13	1	602	electricity
	Essent	Geertruidenberg	Amer-8	1	645	electricity + heat
	Essent	Geertruidenberg	Amer-9	1	600	electricity + heat
	NUON	Buggenum	Willem-Alexander	1	253	electricity
subtotal				**8**	**4.176**	
nuclear energy						
nuclear energy	Delta/EPZ	Borssele	Borssele-30	1	485	electricity
subtotal				**1**	**485**	
total				**52**	**14.940**	

I.12 Appendix I-C: Overzicht geplande gas- en kolenenergiecentrales Nederland

Tabel I.7 Overzicht geplande gas- en kolenenergiecentrales Nederland

source	company	location	number of factories (pcs)	electrical power (MW_p)	output	start of operation (year)
gas						
natural gas	Air Liquide/Shell	Pernis	1	300	electricity + heat	2007
	Delta/EdF	Sloegebied	1	820	electricity	2009
	Electrabel	Lelystad (Flevopolder)	2	400	electricity	2009
	Eneco/IP	Europoort Rotterdam	2	420	electricity	2011
	Essent	Maasbracht	1	1.200	electricity	2009
	Essent	Moerdijk	1	400	electricity	2009
	Intergen	Rijnmond (Pernis)	1	450	electricity	2012
natural gas + blast furnace gas	NUON	Velsen	1	*	electricity	*
subtotal			**10**	**3.990**		
coal (incl. biomass)						
coal + biomass	E.ON	Rijnmond	1	1.070	electricity	2012
	Electrabel	Maasvlakte	1	800	electricity	2011-2012
	Essent	Geertruidenberg	1	800	electricity	2013
	RWE Power AG	Eemshaven	2	800	electricity	2012-2013
coal + biomass + gas	NUON	Eemshaven	1	1.200	electricity	2011
subtotal			**6**	**4.670**		
total			**16**	**8.660**		

*: unknown data

I.13 Appendix I-D: Overzicht huidige waterkrachtcentrales in Nederland

Tabel I.8 Overzicht huidige waterkrachtcentrales in Nederland

source	company	location (river)	number of turbines (pcs)	electrical power (MW_p)	annual production (GWh)	number of housekeepings (pcs)	output
water							
running water	Essent	Gramsbergen (Vecht)	1	0,1	0,3	100	electricity
	Essent	Linne (Maas)	1	11,5	32	10.000	electricity
	Nederstroom	Roermond (Roer)	1	0,25	2	588	electricity
	NUON	Alphen (Maas)	1	14	44	18.000	electricity
	NUON	Maurik (Lek)	1	10	24	12.000	electricity
	NUON/RWS	Hagestein (Lek)	1	1,8	5	1.470	electricity
total			**6**	**37,65**	**107,3**	**42.158**	

legend:

based on annual production divided by average annual electricity consumption of one housekeeping (3.402 kWh).

I.14 Appendix I-E: Overzicht huidige zonnestroomprojecten in Nederland

Tabel I.9 Overzicht huidige zonnestroomprojecten in Nederland

source	location	project	area (m^2)	electrical power (kW_p)	annual Production (MWh)	number of housekeepings (pcs)	output
sun	**Brabant**						
solar radiation	Berkel-Enschot	Office building - Rabobank	85	9,8	7,5	2	electricity
	Boxtel	Education centre - De kleine aarde	*	7,8	*	*	electricity
	Boxtel	Houses - In Goede Aarde	423	43,2	38,88	72	electricity
	Breda	Atelier	58	7,59	7	2	electricity
	Cuijk	Regional environmental company	46	4,8	3,6	1	electricity
	Den Bosch	Apartment building - Paleiskwartier	240	22,8	18,2	5	electricity
	Eindhoven	Office building - Free Energy Europe	50	1,7	1,2	0	electricity
	Eindhoven	Parking garage - Mathildelaan	253	25	17	5	electricity
	Etten-Leur	Houses	1.105	150	119,75	22	electricity
	Etten-Leur	Houses - De Keen	931	128,1	118,23	21	electricity
	Etten-Leur	Houses - De Keen	969	103	76	38	electricity
	Geldrop	Weverij museum	150	14,6	12,055	4	electricity
	Helmond	Noise barrier - Brandevoort	920	104	80	24	electricity
	Herpen	Sanitary building	9	1,3	1,15	0	electricity
	Nuenen	House - Boordseweg	59	3,456	3,352	1	electricity
	Veldhoven	House	30	3,96	3,17	1	electricity
	Waalwijk	Houses - Zanddonk-Zuid	168	16	12	28	electricity
	Waalwijk	Waste site - Gansooyensesteeg	8.000	800	577	170	electricity
sun	**Drenthe**						
solar radiation	Annen	Power station - Annen (Essent)	1.800	180	156	50	electricity
	Borger	Office building - Rabobank	12	1,2	0,96	0	electricity
	De Wijk	Senior apartment building - 'Dunninghe'	92	7,56	5,076	1	electricity
	Schoonebeek	Storage site - NAM	20	2,2	1,6	0	electricity
sun	**Flevoland**						
solar radiation	Almere	Houses - Tussen de Vaarten	1.484	142,4	106,8	371	electricity
	Dronten	Houses - De munten	*	228,8	*	520	electricity
	Dronten	Houses - De munten	*	*	*	70	electricity
	Lelystad	Houses - Landstrekenwijk	490	46,55	35	49	electricity
sun	**Friesland**						
solar radiation	Appelscha	Social housing - Olmen Es	40	3,8	3,04	1	electricity
	Burgum	Sporting centre Burgum	177	17,6	12	4	electricity
	Drachten	Adverium Drachten	382	38,2	*	*	electricity
	Eernewoude	Workshop - It Fryske Gea	80	8	7	2	electricity
	Leeuwarden	Houses	510	69	55,08	15	electricity
	Leeuwarden	Houses - Bastioneiland	80	8	6	20	electricity
	Oosterzee	Office building - Antinodes CV	125	17	15	4	electricity
	Reduzum	School	36	4,84	3,6	1	electricity
	Stavoren	Recreational houses - De leguaan2	42	3,5	2,9	2	electricity
	Stavoren	Recreational houses - De leguanen	350	35	28,371	12	electricity
sun	**Gelderland**						
solar radiation	Apeldoorn	District centre - Woudhuis	164	18,8	14,1	4	electricity
	Apeldoorn	Energiezone	*	*	*	*	electricity
	Apeldoorn	Houses - Woudhuis	3.463	218,8	175	94	electricity
	Apeldoorn	Office building - Hollander	128	14	11	3	electricity
	Arnhem	EnergieNed	*	1,57	*	*	electricity
	Barchem	Conference site - Morgenstern	24	2,64	2	1	electricity
	Barneveld	Workshop - Leertouwer	410	35	*	*	electricity
	Boven Leeuwen	Houses - Zonnewoud	840	79,8	55,86	42	electricity
	Culemborg	Houses - Lanxmeer	184	18,4	14,72	26	electricity
	Doetinchem	Houses	98	*	*	14	electricity
	Dongen	Townhall	572	53	54,4	16	electricity
	Geldermalsen	Utility pavilion	*	5	*	*	electricity
	Harderwijk	Houses - Drielanden	355	36	30	51	electricity
	Harderwijk	Houses - Pandahouses (WWF)	180	14	*	31	electricity
	Nijmegen	Athletics association Nijmegen	240	24	15	4	electricity
	Nijmegen	Autoverhuurbedrijf Nijmegen	20	1,9	1,4	0	electricity
	Scherpenzeel	Utility building - Interface	133	13,3	9,975	3	electricity
	Scherpenzeel	Workshop - Veros	34	9,8	7,35	2	electricity
	Tiel	Houses - Passewaaij	80	5,6	2,75	20	electricity
	Twello	Consultancy bureau - Wasco Holding	90	11,3	8,475	2	electricity
	Vaassen/Bodegraven	Houses	110	12,4	8,7	13	electricity
	Wageningen	Municipal workshop	950	101	*	*	electricity
	Wageningen	Sporting Spaces	*	278	*	*	electricity
	Zutphen	Houses - De Bronsbergen	*	530	*	108	electricity
		NUON Duurzame energie	1.350	162	135	372	electricity
sun	**Groningen**						
solar radiation	Haren	Public library	136	7,3	7	2	electricity
sun	**Limburg**						
solar radiation	Beek	Office building - Maastricht (airport)	68	10,2	8,4	2	electricity
	Heerlen	Houses - Carisborg	205	21,6	15,822	54	electricity
	Heerlen	Industrial site Beitel - Logistics centre	8	0,7	0,654	0	electricity
	Maastricht	Houses	275	27,5	22	100	electricity
	Maastricht	Houses - Vroendaal	280	27,44	*	28	electricity
	Maastricht	Office building - Utility companies	45	4,84	4,5	1	electricity
	Maastricht	Public library	98	8,5	8	2	electricity
	Sittard	Houses - Haagsittard-park	382	38,5	32,5	15	electricity
	Sittard	Stadium - Fortuna stadium	210	*	*	*	electricity
sun	**Noord-Holland**						
solar radiation	Alkmaar	Houses - 5 MW Project (Vroonermeer)	5.217	704	668,8	210	electricity
	Amstelveen	Houses - Bankras/Kostverloren	198	19,4	16,53	6	electricity
	Amstelveen	Office building - Kronenburg Oost	270	25,84	17,302	5	electricity
	Amsterdam	Apartment building - Nieuw-Sloten	2.358	250	174	71	electricity
	Haarlemmermeer	Exhibition roof - 2,3 MW Project (Floriade)	20.000	2.400	1.200	353	electricity
	Heerhugowaard	Footballclub building - Reiger boys	390	53	50,35	15	electricity
	Julianadorp	Houses - Malzwin-Zuid	88	8,8	7,04	22	electricity
	Langedijk	Houses - 5 MW Project	1.320	130	100	23	electricity
	Langedijk	Houses - 5 MW Project (Mayersloot-West)	990	112	84,15	11	electricity
	Langedijk	Houses - Mayersloot-West	164	15,6	13,12	41	electricity
	Ouderkerk a/d Amstel	Noise barrier - Ouder Amstel	1.771	205	176	52	electricity
	Petten	Laboratory building - ECN 31	*	71,9	*	*	electricity
	Petten	Office and laboratory building - ECN 42	700	70	56	16	electricity
	St. Maartenszee	Recreational houses	650	80,37	63,2	47	electricity
	Zandvoort	House - Zero energy house	*	*	*	*	electricity
	Zwaag	House	50	5,13	4,1	1	electricity

Vervolg van Tabel I.9

source	location	project	area (m^2)	electrical power (kW_p)	annual Production (MWh)	number of housekeepings (pcs)	output
sun	**Overijssel**						
solar radiation	Almelo	Apartment building - Nijrees	90	14,4	11,6	3	electricity
	Almelo	Houses - Nijrees	925	91,2	*	210	electricity
	Almelo	Houses - Nijrees	432	40	32	100	electricity
	Zwolle	Houses - Stadshagen	355	30,14	23,46	48	electricity
	Zwolle	Parking garage	845	27	*	*	electricity
sun	**Utrecht**						
solar radiation	Amersfoort	Project Nieuwland - Total	12.299	1.351	1.139,1	335	electricity
	Amersfoort[1]	Building - 1 MW Project Nieuwland (kindergarten Plons)	82	8	6,5	2	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland	1.107	110	88	50	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Rietgors)	*	*	*	*	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (apartments Gele Iis)	188	13	9,6	3	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Cascade)	636	87	77	32	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Energy balance dwelling)	203	21,8	15	2	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Jersey)	3.480	350	*	*	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Kroosbuurt)	2.557	258	*	126	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Mattenbies)	2.400	255,36	*	96	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Noise wall houses)	225	18	12,25	56	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Phanta Rhei)	860	85	65	19	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Pitrus)	529	47,15	*	23	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Prefab PV-Roofs)	576	55	48	19	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Row houses)	108	9,12	*	24	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (School houses)	285	26	19,7	6	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Social housing)	1.125	110	82,5	24	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (Watergentiaan - Waterdrieblad)	755	98	*	*	electricity
	Amersfoort[1]	Houses - 1 MW Project Nieuwland (waterhouses)	179	19	*	19	electricity
	Amersfoort[1]	Schools - 1 MW Project Nieuwland (elementary schools)	*	20	14	4	electricity
	Amersfoort[1]	Sporting centre - 1 MW Project Nieuwland (Sporting centre Nieuwland)	458	46	35	10	electricity
	Bilthoven	Office building - Woonstichting SSW	207	18,24	15	4	electricity
	De Bilt	Noise barrier - A27	550	55	33	10	electricity
	Houten	Fire station	400	23,9	30	9	electricity
	Houten	Houses - Overdam II	3.000	300	198	151	electricity
	IJsselstein	Houses - Zenderpark	363	20	10,5	14	electricity
	Leusden	Office building - Waterschap Vallei en Eem	120	7	7,8	2	electricity
	Nieuwegein	Houses - Galecop (WWF)	314	31,8	0,32	77	electricity
	Utrecht	Houses - Leidsche Rijn	113	9,8	7,7	2	electricity
	Veenendaal	Houses - Gelderse Blom	2.424	*	259,873	101	electricity
	Veenendaal	School - Rembrandt College	430	37	30	9	electricity
	Wijk bij Duurstede	House - De Geer	17	1,54	1,23	1	electricity
	Woerden	Office building - Stichting Woonbelangen	21	2,28	15	4	electricity
sun	**Zeeland**						
solar radiation	Oostburg	Hospital - Antonius	155	16,35	12,274	4	electricity
	Oostburg	School - 't Zwin college	84	8,55	6,652	2	electricity
	Terneuzen	Hospital - De Honte	203	21,36	16,075	5	electricity
	Terneuzen	Test project	24	2,4	1,8	1	electricity
	Vlissingen	House - Caljouw	*	2,1	*	*	electricity
sun	**Zuid-Holland**						
solar radiation	Barendrecht	Houses - Nieuweland	*	18	*	12	electricity
	Barendrecht	Houses - Riederhoek	896	78,4	62,72	28	electricity
	Bodegraven	Office building - Thermo-Staete	100	11,88	7,512	2	electricity
	Delft	Apartment building - Delfgaauwse Weye	350	33	26,4	8	electricity
	Delft	Hall - WL|Delft Hydraulics	6.300	351,2	233	68	electricity
	Delft	House - Schutterstraat	8	0,91	0,7	1	electricity
	Delft	Monumental building - De Witte Roos	27	3,36	3	1	electricity
	Den Haag	Senior apartment building	230	20	16	5	electricity
	Dordrecht	Houses - Oudelandshoek	209	22,8	17,6	22	electricity
	Dordrecht	Houses - Stadspolder	19	1,5	0,72	39	electricity
	Dordrecht	Senior apartment building	64	7,7	6,11	5	electricity
	Gorinchem	Municipal workshop	40	4,4	3,52	1	electricity
	Gouda	Houses + ligthening - Achterwillens	58	5,8	4,62	5	electricity
	Gouda	Office building - Le Donjon	78	6	*	*	electricity
	Gouda	Powerstation - Waalersluis	80	8	6	2	electricity
	Gouderak	House	34	3,85	3,85	1	electricity
	Katwijk	School - MBO	33	*	*	*	electricity
	Krimpen a/d IJssel	Houses - Lansingh-Zuid	81	10	7,5	31	electricity
	Leiden	Houses - Leiden centre	*	*	*	10	electricity
	Leiden	Zonnewende	*	11,5	*	*	electricity
	Lekkerkerk	House - Groene Zoom	34	2,85	2	1	electricity
	Nieuwerkerk a/d IJssel	Houses - Esse laag	280	28	22,4	70	electricity
	Noordwijk	School - De Jutter	5	0,516	*	*	electricity
	Noordwijkerhout	Hotel - Golden Tulip Conference Hotel Leeuwenhorst	180	18	13	4	electricity
	Pijnacker	Houses	*	*	*	18	electricity
	Ridderkerk	Houses - 't Zand	303	33,24	26,5	12	electricity
	Rijswijk	Office building - Eneco Hoornwijk	110	8,6	4,9	1	electricity
	Rotterdam	Apartment building - Pendrecht 'De Bommelflats'	400	40	23,8	112	electricity
	Rotterdam	Houses - Stadstuinen	200	19	14	200	electricity
	Rotterdam	Municipality archive Rotterdam	1.840	174,8	110,4	32	electricity
	Rotterdam	Stadium - Sparta stadium	69	7,7	6	2	electricity
	Sliedrecht	Houses - Boerhave	545	61	48,7	22	electricity
	Vlaardingen	School - VOS	80	9	5	1	electricity
	Woubrugge	House - Zero energy house Kroon	30	3,8	2,4	1	electricity
	Zoetermeer	Houses - Noordhove (De Boomgaard)	270	29,7	21,6	90	electricity
	Zoetermeer	Houses - Noordhove (Pandawoningen)	420	35,28	24,7	35	electricity
total			**101.257**	**11.385,532**	**7.385,747**	**5.339**	

legend:

based on annual production divided by average annual electricity consumption of one housekeeping (3.402 kWh).

*: unknown data

1) part of Project Nieuwland (numbers are included in 'Project Nieuwland - Total')

remark: List not complete!

I.15 Appendix I-F: Overzicht huidige windenergiecentrales in Nederland

Tabel I.10 Overzicht huidige windenergiecentrales in Nederland (per provincie)

source	location	number of turbines (pcs)	electrical power (MW_p)	annual Production (GWh)	output
wind					
mechanical	Brabant	44	39,685	83,750	electricity
	Drenthe	1	0,800	1,800	electricity
	Flevoland	597	608,135	1.159,984	electricity
	Friesland	316	133,163	314,088	electricity
	Gelderland	11	12,380	21,451	electricity
	Groningen	208	125,828	269,589	electricity
	Limburg	3	5,750	10,197	electricity
	Noord-Holland	312	250,365	567,639	electricity
	Overijssel	4	6,060	12,080	electricity
	Utrecht	4	6,080	12,115	electricity
	Zeeland	197	195,145	454,212	electricity
	Zuid-Holland	155	247,840	627,080	electricity
	Noordzee	36	108,000	350,000	electricity
total		**1.888**	**1.739,231**	**3.883,985**	

I.16 Appendix I-G: Overzicht geplande windenergiecentrales in Nederland

Tabel I.11 Overzicht geplande windenergiecentrales in Nederland (per provincie)

source	location	number of turbines (pcs)	electrical power (MW_p)	output	start of operation (year)
wind					
mechanical	Brabant	0	0	electricity	-
	Drenthe	0	0	electricity	-
	Flevoland	0	0	electricity	-
	Friesland	8	6,15	electricity	2008
	Gelderland	12	24	electricity	2008
	Groningen	68	204	electricity	2008
	Limburg	0	0	electricity	-
	Noord-Holland	9	27	electricity	2008
	Overijssel	0	0	electricity	-
	Utrecht	0	0	electricity	-
	Zeeland	12	10,8	electricity	2008
	Zuid-Holland	0	0	electricity	-
	Noordzee	60	120	electricity	2008
total		**169**	**391,95**		

I.17 Appendix I-H: Overzicht huidige energiebronnen in Nederland

Tabel I.12 Overzicht huidige energiebronnen in Nederland

source	application	per unit		total Netherlands				electrical efficiency	time			CO_2-emission	costs	
		maximum electrical power (MW)	unit type	number of units (pcs)	electrical power (MW_e)	bruto electrical production in 2006 (GWh)	percentage of total bruto electricity consumption in 2006 (%)	(%)	operation hours per year (h)	energetical payback period (year)	technical lifetime (year)	(kg/MWh)	investment (€/kW)	energy (€/kWh)
fossil fuels + nuclear														
natural gas + blast furnace gas	power plant	820	plant	43	10.279	57.043	57,86	46-55	6.000	*	*	350-450	575-925	0,036
coal (+ biomass)	power plant	645	plant	8	4.176	23.126 (4.715)[1]	23,46 (4,78)[1]	36-44	7.000	*	*	850-1.000 (0-540)[1]	1.200-2.000 (590-7.450)[1]	0,045
nuclear energy	power plant	485	plant	1	485	3.469	3,52	33	7.000	*	*	3,5-100	2.000	0,046
water														
running water	power plant	14	plant	6	38	106	0,11	75-90	2.737	*	40-50	8-33	4.000-4.500	0,2
sun														
solar radiation	photovoltaic panels	2,4	project	*	53	35	0,04	8-16	1.000	2-4	20-25	50-60	3.300-4.500	0,6
wind														
mechnical	turbines (onshore)	4,5	turbine	1.852	1.631	2.733	2,77	10-40	1.800	1/4 - 1/2	20	9-25	1.000-1.200	0,088
	turbines (offshore)		turbine	36	108				3.350				1.400-2.000	0,103
other														
other	-	-	-	-	-	7.359	7,46	-	-	-	-	-	-	-
total						**98.586**	**100,00**							

legend:
*: unknown data
1: numbers for biomass
-: not applicable

I.18 Appendix I-I: Overzicht potentieel aan energie voor de Afsluitdijk

Tabel I.13 Overzicht potentieel aan energie voor de Afsluitdijk

source	subdivision	application	per unit			Afsluitdijk			
			electrical power (peak) (kW_p)	annual production per unit (kWh)	unit type	number of units	electrical power (peak) (MW_p)	annual production (MWh)	housekeepings (pcs)
water									
running water	-	hydroelectric power plant	10[A]	*	m^3/s	325	0,80	10.000	2.500
tides	tidal differences	hydroelectric power plant	20[B]	52.850[B,C]	m^3/s	5.000	100	262.800[C]	50.000[C]
	tidal streams	turbine	24[D]	62000[D]	m/s	-	-	-	-
waves	-	convertor	0,12[E]	*	m	32.000	3,84[E]	*	*
salinity gradient	Pressure Retarded Osmosis (PRO)	osmotic power plant	1.000	*	m^3/s	200	200	*	500.000
	Reversed Electro Dialysis (RED)	osmotic power plant	1.000	*	m^3/s	200	200	*	500.000
sun									
solar radiation	-	photovoltaic panel (PV)	0,10	80	m^2	124.800	12,48	9.984	3.000
wind									
mechanical	-	turbines	2,55	*	turbine	109	278	500.400	147.090
electrostatical	-	elektrostatische Windenergie Convertor (EWICON)	1	*	convertor	*	*	*	*

legend

[A]: based on a heigt difference of 1 meter.

[B]: based on a tidal difference of 2 meter.

[C]: based on a production time of 30%.

[D]: based on a tidal velocity of 1 meter per second.

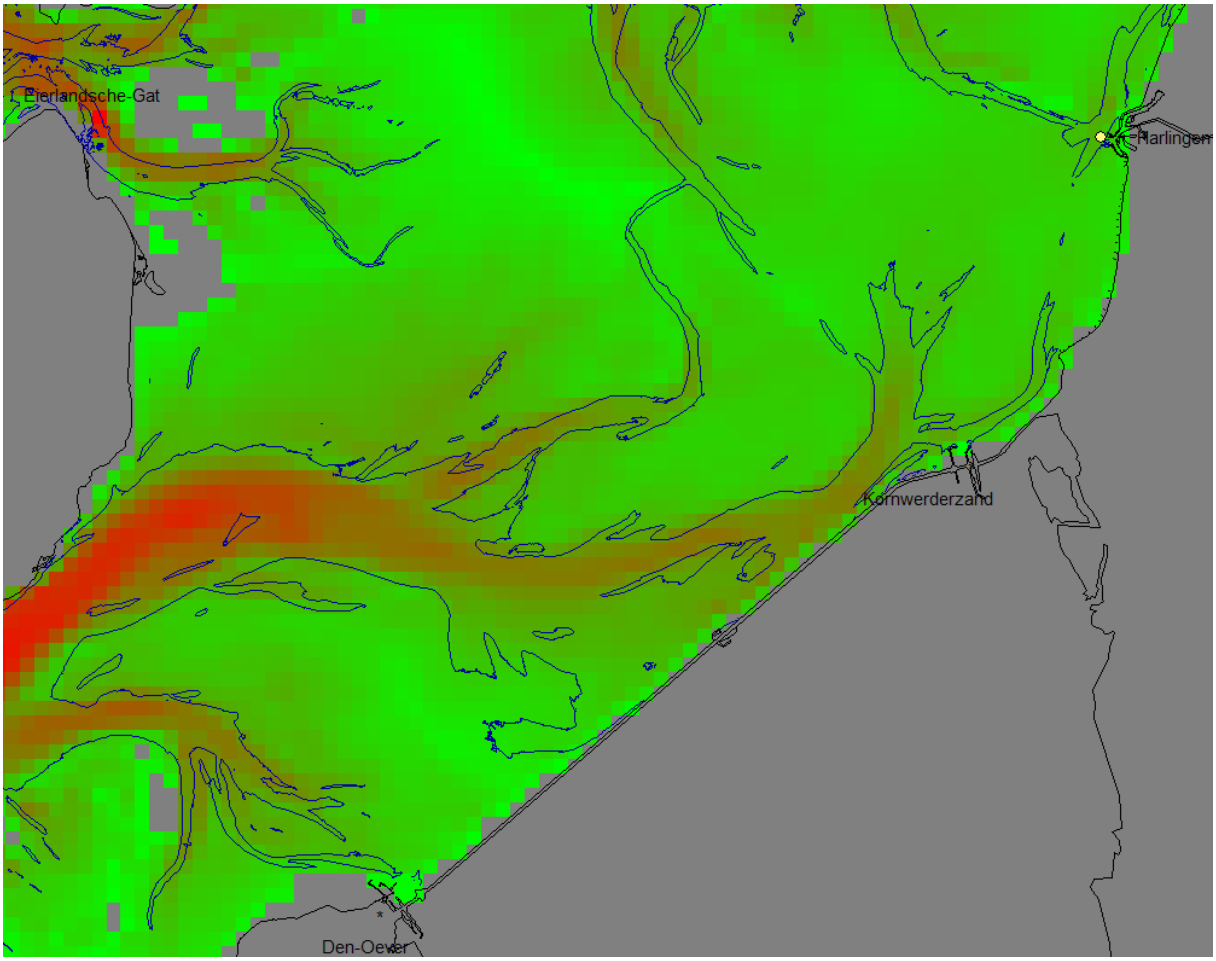
[E]: based on an average wave height of 0,20 meter and period of 3 seconds.

: based on annual production divided by average annual electricity consumption of one housekeeping (3.402 kWh).

*: unknown data

-: not applicable

J Stromingskaart Waddenzee



Figuur J.1 Stromingskaar Waddenzee (Sedimentatlas)

Legenda:

stroomsnelheden in centimeters per seconde
- 0.0
- 25.0
- 50.0
- 75.0
- 100.0
- 125.0
- >150.0

landsgrenzen
Dieptelijn -3.5 meter NAP
meetstations

K Geometrie Afsluitdijk

In Tabel K.1 is het dwarsprofiel van de Afsluitdijk weergegeven. De overige gegevens met betrekking tot de geometrie van de Afsluitdijk zijn te vinden in Tabel K.2.

Tabel K.1 Dwarsprofiel Afsluitdijk

locatie	x (m)	y (m+NAP)	x_{bk}-x (m)	Δx (m)	Δy (m)	tanα (-)
voorland	0,00	-11,20	1.000,00	-	-	-
	200,00	-7,70	800,00	200,00	3,50	0,02
	400,00	-5,20	600,00	200,00	2,50	0,01
	600,00	-7,00	400,00	200,00	-1,80	-0,01
	800,00	-3,70	200,00	200,00	3,30	0,02
teen	964,61	-2,30	35,39	164,61	1,40	0,01
berm	968,41	-0,40	31,59	3,80	1,90	0,50
buitentalud	971,59	-0,30	28,41	3,18	0,10	0,03
	978,33	1,92	21,67	6,74	2,22	0,33
	990,29	5,65	9,71	11,96	3,73	0,31
	993,09	6,27	6,91	2,80	0,62	0,22
	996,13	6,98	3,87	3,04	0,71	0,23
	997,96	7,34	2,04	1,83	0,36	0,20
kruin	1.000,00	7,79	0,00	2,04	0,45	0,22
binnentalud	1.002,38	7,86	-2,38	2,38	0,07	0,03
	1.009,08	5,07	-9,08	6,70	-2,79	-0,42
fietspad	1.009,92	5,00	-9,92	0,84	-0,07	-0,08
	1.013,30	4,90	-13,30	3,38	-0,10	-0,03
rijksweg	1.016,07	4,31	-16,07	2,77	-0,59	-0,21
gras	1.026,61	4,37	-26,61	10,54	0,06	0,01
rijksweg	1.029,67	4,35	-29,67	3,06	-0,02	-0,01
gras	1.040,63	4,27	-40,63	10,96	-0,08	-0,01
binnentalud	1.043,01	3,92	-43,01	2,38	-0,35	-0,15
	1.051,04	1,61	-51,04	8,03	-2,31	-0,29
berm	1.055,60	-0,30	-55,60	4,56	-1,91	-0,42
	1.059,02	-0,40	-59,02	3,42	-0,10	-0,03
	1.062,72	-2,25	-62,72	3,70	-1,85	-0,50

Tabel K.2 Geometrische gegevens Afsluitdijk

element	eenheid	waarde	dimensie
lengte dijklichaam	L	29.860	(m)
lengte kunstwerken	L	1.540	(m)
lengte totaal	L	31.400	(m)
kruinhoogte op buitenkruinlijn (gemiddeld)	h_{kr}	7,80	(m+NAP)
kruinhoogte op buitenkruinlijn (Kornwerderzand-Zurich (28,1-28,6 km)	h_{kr}	10,40	(m+NAP)
kruinhoogte op buitenkruinlijn (Kornwerderzand-Zurich (30,9-31,4 km)	h_{kr}	9,80	(m+NAP)
breedte dijklichaam	L	85,00	(m)
breedte kruin	L	2,00	(m)
taludhelling voorland Waddenzee	cotanα	50	(-)
taludhelling onderwatertalud Waddenzeezijde	cotanα	4	(-)
taludhelling onderste deel bovenwatertalud Waddenzeezijde	cotanα	4	(-)
taludhelling tuimelkade Waddenzee	cotanα	4	(-)
taludhelling binnentalud IJsselmeerzijde	cotanα	2,36	(-)
bodempeil voorland IJsselmeer (Kornwerderzand)	z	-2,10	(m+NAP)
bodempeil voorland IJsselmeer (Den Oever)	z	-2,35	(m+NAP)
bodempeil voorland Waddenzee (100 m uit perkoenrij)	z	-2 à -3	(m+NAP)
bodempeil voorland Waddenzee (100 m uit perkoenrij (bij geulen))	z	-6 à -7	(m+NAP)
bodempeil voorland Waddenzee (1.000 m uit perkoenrij)	z	-11,20	(m+NAP)

L Ligging Afsluitdijk

In Tabel L.1 zijn de geografische gegevens van de Afsluitdijk weergegeven voor de berekening van de positionering van de Afsluitdijk.

Tabel L.1 Positionering Afsluitdijk (Google Earth)

	positie links						positie rechts					
	noorderbreedte			oosterlengte			noorderbreedte			oosterlengte		
dijkvak	(°)	(')	(")	(°)	(')	(")	(°)	(')	(")	(°)	(')	(")
Den Oever - knik 1	52	56	26,0	5	3	15,0	53	3	53,0	5	17	28,0
knik 1 - knik 2	53	4	9,0	5	18	13,0	53	4	19,5	5	19	20,0
knik 2 - Zurich	53	4	42,0	5	21	4,0	53	5	22,0	5	22	13,0

Hieruit kan het verschil worden berekend (zie Tabel L.2).

Tabel L.2 Verschil in positie

	verschil					
	noorderbreedte			oosterlengte		
dijkvak	(°)	(')	(")	(°)	(')	(")
Den Oever - knik 1	0	7	27,0	0	14	13,0
knik 1 - knik 2	0	0	10,5	0	1	7,0
knik 2 - Zurich	0	0	40,0	0	1	9,0

Met dit verschil kunnen de afstand en de hoek berekend worden. Dit gebeurt met vergelijking (L.1) en vergelijking (L.2):

$$\Delta x = \left(\frac{O_{aarde}}{\alpha_{aarde;1}}\right)\beta_{aarde;1} + \left(\frac{O_{aarde}}{\alpha_{aarde;2}}\right)\beta_{aarde;2} + \left(\frac{O_{aarde}}{\alpha_{aarde;3}}\right)\beta_{aarde;3} \quad \text{(L.1)}$$

en

$$\Delta y = \left(\frac{O_{aarde}}{\alpha_{aarde;1}}\right)\beta_{aarde;1} + \left(\frac{O_{aarde}}{\alpha_{aarde;2}}\right)\beta_{aarde;2} + \left(\frac{O_{aarde}}{\alpha_{aarde;3}}\right)\beta_{aarde;3} \quad \text{(L.2)}$$

waarin:

Δx	=	afstand oosterlengte	[m]
Δy	=	afstand noorderbreedte	[m]
O_{aarde}	=	omtrek van de aarde (40.000.000 m)	[m]
$\alpha_{aarde;1}$	=	totale hoek in graden (360 graden)	[°]
$\alpha_{aarde;2}$	=	totale hoek in minuten (21.600 minuten)	[']
$\alpha_{aarde;3}$	=	totale hoek in seconden (1.296.000 seconden)	["]
$\beta_{aarde;1}$	=	verschil in hoek (graden)	[°]
$\beta_{aarde;2}$	=	verschil in hoek (minuten)	[']
$\beta_{aarde;3}$	=	verschil in hoek (seconden)	["]

met:

O_{aarde}	=	40.000.000 m
$\alpha_{aarde;1}$	=	360 °
$\alpha_{aarde;2}$	=	21.600 '
$\alpha_{aarde;3}$	=	1.296.000 "

Vervolgens kan de directe afstand tussen twee punten berekend worden met vergelijking (L.3):

$$L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{L.3}$$

waarin:

L	=	directe afstand	[m]

De hoek ten opzichte van het noorden kan berekend worden met vergelijking (L.4):

$$\beta = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \tag{L.4}$$

waarin:

β	=	hoek tussen lengte-as van het dijkvak en het noorden	[°]

De lengtes en hoeken zijn weergegeven in Tabel L.3.

Tabel L.3 Lengte en hoeken

dijkvak	Δx (m)	Δy (m)	L (m)	β (°)
Den Oever - knik 1	26327,16	13796,30	29723,01	62,3
knik 1 - knik 2	2067,90	324,07	2093,14	81,1
knik 2 - Zurich	2129,63	1234,57	2461,60	59,9

M Grondmechanische gegevens Afsluitdijk

Tabel M.1 Beschrijving bodemtypen Afsluitdijk (Rijkswaterstaat, 2005)

type	omschrijving	grondlaag 1	onderkant laag (m+NAP)	grondlaag 2
A	zandig op keileem	wadzand zandig	-5 à -6	keileem
B	zandig op keileem	wadzand zandig	-7 à -8	keileem
C	zandig op keileem	wadzand zandig	-8 à -10	keileem
D	zandig op klei op keileem	wadzand zandig	-8	klei op keileem
E	kleiig op zand op keileem	wadzand kleiig	-8	zand op kleileem
F	kleiig op klei	wadzand kleiig	-10 à -16	klei op keileem
G	kleiig op zand	wadzand kleiig	-10 à -16	zand
G	zandig op zand	wadzand zandig	-12	zand

De rekenwaarde, ofwel ontwerpwaarde, van een grondparameter wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$X_d = \frac{X_{rep}}{\gamma_m} \qquad \text{(Rijkswaterstaat, 2005)} \qquad \text{(M.1)}$$

waarin:

X_d	=	rekenwaarde van een grondparameter	[-]
X_{rep}	=	representatieve waarde van een grondparameter	[-]
γ_m	=	partiële materiaalfactor	[-]

De partiële materiaalfactoren zijn weergegeven in Tabel M.2.

Tabel M.2 Materiaalfactoren (Rijkswaterstaat, 2005)

materiaalfactor	partiële materiaalfactor γ_m (-)
volumieke massa (ρ_{nat} en ρ_{droog})	1,0
inwendige wrijving zand (tanϕ)	1,10
inwendige wrijving klei (tanϕ)	1,20
inwendige wrijving veen (tanϕ)	1,25
cohesie (c)	1,25
doorlatendheid (k_h en k_v)	1,0

Tabel M.3 Aangenomen grondparameters dijklichaam Afsluitdijk

parameter	dimensie	dijkzand		dijkkeileem		bekledingsklei	
		X_{rep}	X_d	X_{rep}	X_d	X_{rep}	X_d
ρ_{droog} [1]	(kN/m^3)	17,5	17,5	18,5	18,5	15,3	15,3
ρ_{nat} [1]	(kN/m^3)	18,5	18,5	20,8	20,8	17,3	17,3
c' [1]	(kPa)	0	0	5	4	1,5	1,2
ϕ' [1]	(°)	32	29,6	35	30,3	36,5	31,7
k_h [2]	10^{-7} (m/s)	60	60	0,003	0,003	0,3	0,3
k_v [2]	10^{-7} (m/s)	60	60	0,003	0,003	0,3	0,3

[1] De parameters voor dijkzand zijn bepaald op basis van tabel 1 (representatieve waarden voor grondeigenschappen) NEN 6740, gecorreleerd aan de conuswaarde in de sondeergrafieken, de parameters voor de keileem die in de dijk verwerkt is en de bekledingsklei zijn gebaseerd op de resultaten van laboratoriumonderzoek (Grondmechanica Delft, 1987).

[2] Doorlatendheid geschat op basis van ervaringscijfers, k_h heeft betrekking op de horizontale doorlatendheid, k_v op de verticale. Bij alle afzettingen is de verticale doorlatendheid even groot als de horizontale.

N Gegevens Waddenzee en IJsselmeer

N.1 Waddenzee

Tabel N.1 Getijdengegevens Waddenzee

gegeven	eenheid	dimensie	Locatie	
			Den Oever	Kornwerderzand
gemiddelde waterstand	h_{gem}	(m+NAP)	0,06	0,05
gemiddeld laagwater	$h_{gem;lw}$	(m+NAP)	-0,82	-0,91
gemiddeld hoogwater	$h_{gem;hw}$	(m+NAP)	0,72	0,86
hoogst gemeten stormvloedstand	h_{hhw}	(m+NAP)	3,70	3,86
gemiddelde getijamplitude	GGA	(m)	0,77	0,89
duur getijde	t	(s)	44.700	44.700
gemiddelde duur daling getijde	t	(s)	24.600	19.680
gemiddelde duur rijzing getijde	t	(s)	20.100	25.020

N.2 IJsselmeer

Tabel N.2 Waterstanden IJsselmeer

gegeven	h_{gem} (m+NAP)
gemiddeld zomerpeil	-0,20
gemiddeld winterpeil	-0,40

O Berekening golfhoogte bij buitenteen Afsluitdijk

O.1 Ingevoerde parameters

In Tabel O.1 en Tabel O.2 zijn de ingevoerde waarden voor het programma SWAN-1D (Simulating Waves Nearshore 1 dimensional) weergegeven.

Tabel O.1 Ingevoerde bodemprofiel

s (m)	z (m+NAP)
0,00	-10,80
200,00	-4,10
400,00	-3,60
600,00	-4,90
800,00	-2,40
964,61	-3,50

Tabel O.2 Ingevoerde parameters

parameter	eenheid	waarde	dimensie
raairichting	α	-27,7	(°)
	kust	-27,7	(°)
stroming		nee[1]	(-)
golfparameters	H_s	3,50	(m)
	T_p	8,10	(s)
	gemiddelde golfrichting	227,16	(°) t.o.v. noorden
waterpeil	$h_{mhw;G+}$	5,78	(m)
	$h_{mhw;W+}$	6,03	(m)
	golfopzet	nee[2]	(-)
windparameters	windsnelheid	10	(m/s)
	windrichting	251	(°) t.o.v. noorden
locatie gegevens	s	964,61	(m)
berekening	aantal stappen	100	(-)

[1]: voor de stroming is 0 m/s aangehouden. De eb- en vloedstroom staan ongeveer haaks op de raai (ter plaatse van s = 0) en zijn tegengesteld gericht aan elkaar. De maatgevende situatie (grotere golfhoogte met een kortere golfperiode) is bij een stroomsnelheid van 0 m/s.
[2]: de resultaten zonder en met golfopzet blijken nauwelijks te verschillen.

O.2 Resultaten

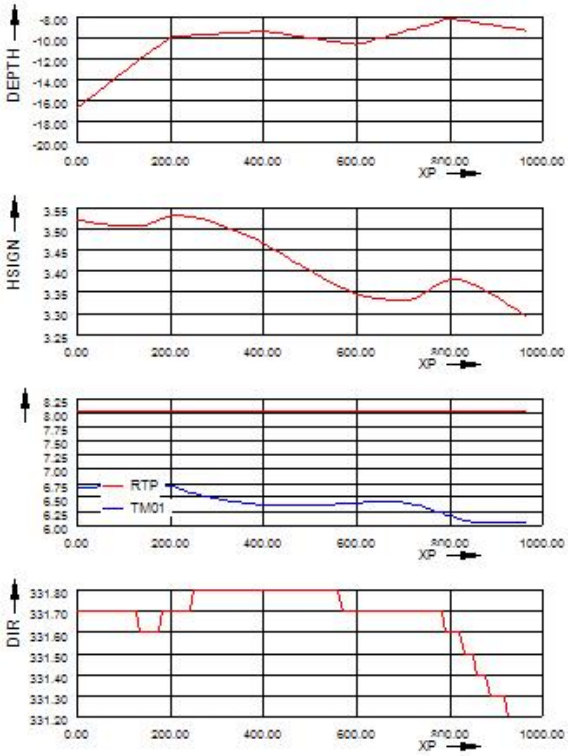
In

Tabel O.3, Figuur O.1 en Figuur O.2 zijn de resultaten van SWAN-1D voor klimaatscenario G+ en W+ weergegeven.

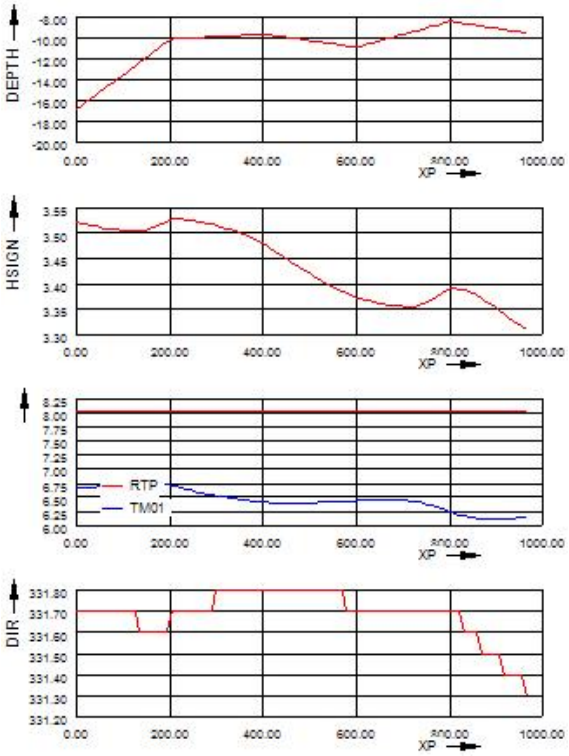
Tabel O.3 Resultaten voor klimaatscenario G+ en W+

s	H_{m0}		T_p		MWD		d+GLLWS+z	
	G+	W+	G+	W+	G+	W+	G+	W+
(m)	(m)	(m)	(s)	(s)	(°)	(°)	(m)	(m)
0,00	3,521	3,522	8,034	8,034	331,700	331,700	16,580	16,830
200,00	3,534	3,528	8,034	8,034	331,600	331,600	9,880	10,130
400,00	3,467	3,479	8,034	8,034	331,800	331,800	9,380	9,630
600,00	3,345	3,372	8,034	8,034	331,700	331,700	10,680	10,930
800,00	3,382	3,391	8,034	8,034	331,600	331,700	8,180	8,430
964,60	3,292	3,257	8,034	8,034	331,200	354,800	9,280	9,530

De waarden van Tabel O.3 zijn grafisch in Figuur O.1en Figuur O.2 weergegeven.



Figuur O.1 Resultaten SWAN-1D (klimaatscenario G+)



Figuur O.2 Resultaten SWAN-1D (klimaatscenario W+)

P Belasting op zonnepanelen door neerslag en wind

P.1 Neerslagbelasting

De belasting op zonnepanelen ten gevolge van neerslag (sneeuw) kan berekend worden met de volgende vergelijking:

$$P_{rep} = c_i P_{sn;rep} \qquad \text{(Briedé, et al., 1995)} \qquad \text{(P.1)}$$

waarbij geldt: $\psi = 0$

waarin:

P_{rep}	=	gelijkmatig verdeelde representatieve sneeuwbelasting	[N/m^2]
c_i	=	sneeuwvormfactor	[–]
$P_{sn;rep}$	=	representatieve sneeuwbelasting	[N/m^2]
ψ	=	momentaanfactor	[–]

In Tabel P.1 is de sneeuwbelasting berekend welke een waarde heeft van 0,56 kN/m^2.

Tabel P.1 Sneeuwbelasting

belasting	c_i (-)	$P_{sn;rep}$ (kN/m^2)	$P_{sn;rep}$ (kN/m^2)
sneeuw	0,8	0,7	0,56

P.2 Windbelasting

Voor windbelasting kan, in het geval van de Afsluitdijk, onderscheid worden gemaakt in de volgende typen:

- winddruk: hierbij blaast de wind op een vlak;
- windzuiging: hierbij blaast de wind van een vlak af;
- windwrijving: de wind blaast evenwijdig aan een vlak.

De belasting op zonnepanelen ten gevolge van wind in algemene vorm is weergegeven in de volgende vergelijking:

$$P_{rep} = c_{index} p_w \qquad \text{(Briedé, et al., 1995)} \qquad \text{(P.2)}$$

waarbij geldt: $\psi = 0$

waarin:

P_{rep}	=	gelijkmatig verdeelde representatieve windbelasting (druk, zuiging of wrijving)	[N/m^2]
c_{index}	=	windvormfactor (druk, zuiging of wrijving)	[–]
p_w	=	extreme stuwdruk	[N/m^2]

In Tabel P.2 is de windbelasting berekend waarbij voor druk een maximale waarde van 0,00 kN/m^2 en voor zuiging een maximale waarde van -0,45 kN/m^2 geldt.

Tabel P.2 Windbelasting

windrichting	type belasting	c_i (-)	p_w (kN/m^2)	$P_{sn;rep}$ (kN/m^2)
naar de wind toegekeerd vlak	druk	0	0,64	0,00
naar de wind toegekeerd vlak	zuiging	-0,7	0,64	-0,45
van de wind afgekeerd vlak	druk	0	0,64	0,00
van de wind afgekeerd vlak	zuiging	-0,63	0,64	-0,40

Q Uitzettingscoëfficiënten constructiematerialen

De uitzetting van materialen kan berekend worden met de volgende vergelijking:

$$\alpha = \frac{1}{L_0}\frac{dL}{dT} \qquad \text{(Q.1)}$$

waarin:

α	=	lineaire uitzettingscoëfficiënt	[K^{-1}]
L	=	lengte	[m]
L_0	=	huidige lengte	[m]
T	=	temperatuur	[°C]

In Tabel Q.1 zijn voor diverse materialen diverse waarden voor α en de uitzettingslengten (per meter) weergegeven. Er is hierbij rekening gehouden met een minimumtemperatuur van -25°C en een maximumtemperatuur van 45°C.

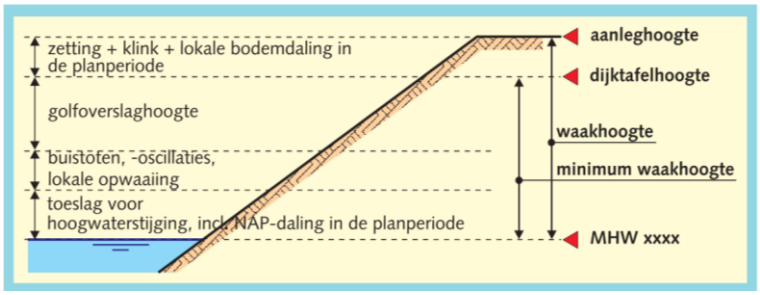
Tabel Q.1 Uitzettingscoëfficiënten voor enkele stoffen

materiaal	α 10^{-6} (K^{-1})	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	ΔT (°C)	L_0 (m)	L 10^{-3} (m)
beton	12,0	-25	45	70,0	1,00	0,84
glas (vensterglas)	7,6	-25	45	70,0	1,00	0,53
staal	12,0	-25	45	70,0	1,00	0,84

R Berekening kruinhoogte

In deze appendix wordt de kruinhoogte voor de Afsluitdijk bepaald op basis van de hydraulische randvoorwaarden bij klimaatscenario G+ en W+. De kruinhoogte wordt bepaald door de som van de volgende bijdragen:

- maatgevend hoogwater (MHW): dit is de waterstand met een overschrijdingskans overeenkomstig de wettelijke norm;
- hoogwaterstijging: dit betreft het samenstel van de mondiale stijging van de zeespiegel/NAP-daling en de eventuele lokale wijzigingen van de getij-amplitude;
- toeslagen: dit zijn toeslagen voor bui-oscillaties, buistoten, seiches en (lokale) opwaaiing;
- golfoverslaghoogte: dit is de hoogte die behoort bij een vooraf vastgestelde hoeveelheid golfoverslag;
- bodemdaling: dit is de lokaal verwachte bodemdaling, bijvoorbeeld als gevolg van (diep)wateronttrekking, winning van delfstoffen (olie, gas, zout), of verlaging van het polderpeil;
- kruindaling: dit is de verwachte kruindaling door klink van het dijklichaam en zetting van de ondergrond in de periode waarvoor de waterkering wordt ontworpen (na oplevering).



Figuur R.1 Bijdragen aanleghoogte kruin (TAW, 1999)

De vergelijking ziet er dan als volgt uit:

$$h_{kr} = h_{mhw2001} + h_{hws} + h_t + h_{ovs} + h_{bd} + h_{zkl} \qquad \text{(TAW 2002)} \qquad \text{(R.1)}$$

waarin:

h_{kr}	=	kruinhoogte	[m+NAP]
$h_{mhw2001}$	=	maatgevende hoogwaterstand (MHW) voor het jaar 2001	[m+NAP]
h_{hws}	=	hoogwaterstijging (inclusief NAP-daling) over de ontwerpperiode	[m]
h_t	=	toeslagen voor bui-oscillaties, buistoten of seiches en lokale opwaaiing	[m]
h_{ovs}	=	golfoploophoogte of golfoverslaghoogte	[m]
h_{bd}	=	lokaal verwachte bodemdaling over de ontwerpperiode	[m]
h_{zkl}	=	verwachte kruindaling door klink en zetting van de ondergrond over de ontwerpperiode	[m]

Hieronder worden deze waarden vastgesteld, waarna de kruinhoogte kan worden berekend.

R.1 Maatgevend hoogwater ($h_{mhw;2001}$)

Voor het maatgevend hoogwater dienen voor de Waddenzee, op basis van klimaatscenario G+ en W+ (waterstand 0,25 m hoger dan de waterstand bij klimaatscenario G+), voor het jaar 2100 de volgende ontwerppeilen aangehouden:
klimaatscenario G+: $h_{mhw;2001;G+} = 5{,}10$ m +NAP ;

klimaatscenario W+: $h_{mhw;2001;W+} = h_{mhw;2001;G+} + 0{,}25\ \text{m} = 5{,}35\ \text{m}$ +NAP .

R.2 Hoogwaterstijging (h_{hws})

De hoogwaterstijging (inclusief de NAP daling) bestaat uit twee bijdragen: toename van de getijdenamplitude en zeespiegelstijging:
Getijdenamplitude: de verwachte toename van de getijdenamplitude bedraagt 0,16 m/eeuw. Dit betekent dat in het jaar 2100 het hoogwater circa 0,08 m hoger en het laagwater circa 0,08 m lager is. Voor de hoogwaterstijging dient rekening te worden gehouden met een toename van 0,08 m op het hoogwater;
Zeespiegelstijging: de zeespiegelstijging is bij het maatgevend hoogwater inbegrepen.

R.3 Toeslagen (h_t)

De toeslagen geldend voor de Waddenzee zijn al in het maatgevend hoogwater ($h_{mhw;2001}$) verwerkt.

R.4 Golfoverslaghoogte (h_{ovs})

Uit de berekening voor de golfoverslaghoogte met behulp van het programma 'PC-Overslag' (zie appendix T) volgt voor beide klimaatscenario's:

- q = 0.1 l/s/m: $h_{ovs} = 7{,}55\ \text{m}$;
- q = 1.0 l/s/m: $h_{ovs} = 5{,}85\ \text{m}$;
- q = 10.0 l/s/m: $h_{ovs} = 4{,}14\ \text{m}$;
- q = 40.0 l/s/m: $h_{ovs} = 3{,}10\ \text{m}$.

R.5 Bodemdaling (h_{bd})

Uit gegevens van Rijkswaterstaat kan voor de bodemdaling bij de Afsluitdijk voor het jaar 2100 een waarde $h_{bd} = 0{,}10\ \text{m}$ (0,08 m voor tektonische bodembeweging en 0,02 m als gevolg van aardgaswinning) worden aangehouden.

R.6 Kruindaling (h_{kd})

De kruindaling is afhankelijk van de klink en zetting van de ophoging, waarbij voor de klink 5% van de ophoging en voor de zetting 0,20 m wordt aangehouden. Dit is een iteratief proces aangezien de waarde voor de ophoging afhankelijk is van de waarde voor de kruindaling. De vergelijking ziet er dan als volgt uit:

$$h_{kd} = 0{,}05 \cdot \Delta h + 0{,}20 \qquad \text{(TAW 2001)} \qquad \text{(R.2)}$$

met: $\Delta h = h_{kr} - h_{kr;pr}$

waarin:

h_{kd}	=	kruindaling	[m]
Δh	=	verschil in kruinhoogte	[m]
h_{kr}	=	nieuwe kruinhoogte	[m+NAP]
$h_{kr;pr}$	=	huidige kruinhoogte	[m+NAP]

R.7 Kruinhoogte

Bovenstaande bijdragen en de totale kruinhoogte zijn in Tabel R.1 weergegeven voor beide klimaatscenario's.

Tabel R.1 Overzicht bijdragen en minimale kruinhoogte bij vastgesteld klimaatscenario en overslagdebiet

klimaat-scenario	q (l/s/m)	$h_{mhw;2001}$ (m+NAP)	$h_{kr;pr}$ (m+NAP)	h_{hws} (m)	h_t (m)	h_{ovs} (m)	h_{bd} (m)	h_{kd} (m)	$h_{kr;min}$[1] (m+NAP)	Δh (m)
G+	0,1	5,10	7,80	0,58	0,00	7,55	0,10	0,50	13,83	6,03
	1	5,10	7,80	0,58	0,00	5,85	0,10	0,41	12,04	4,24
	10	5,10	7,80	0,58	0,00	4,14	0,10	0,32	10,24	2,44
	40	5,10	7,80	0,58	0,00	3,10	0,10	0,27	9,15	1,35
W+	0,1	5,35	7,80	0,58	0,00	7,55	0,10	0,52	14,10	6,30
	1	5,35	7,80	0,58	0,00	5,85	0,10	0,43	12,30	4,50
	10	5,35	7,80	0,58	0,00	4,14	0,10	0,34	10,51	2,71
	40	5,35	7,80	0,58	0,00	3,10	0,10	0,28	9,41	1,61

[1]: $k_{kr;min}$ = minimaal benodigde kruinhoogte

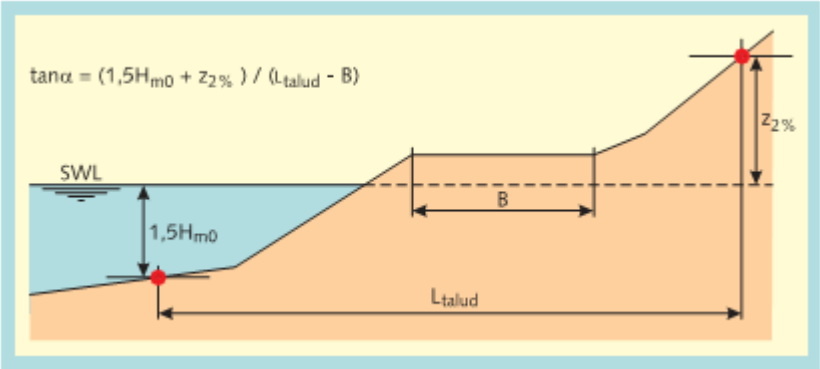
S Berekening golfoploop en golfoverslag (handmatig)

S.1 Golfkarakteristieken

climate-model	h_{mhw} (m+NAP)	H_{m0} (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	g (m/s^2)	L_0 (m)	$s_{m-1,0}$ (-)	tanα (-)	ξ_0 (-)
G+	5,78	3,50	8,10	7,36	9,81	84,66	0,04	0,252	1,24
W+	6,03	3,50	8,10	7,36	9,81	84,66	0,04	0,246	1,21

S.1.1 Gemiddelde taludhelling

Voor de berekening van de golfoploop en -overslag wordt het gemiddelde talud ($\tan\alpha$) gebruikt, wat niet uit een volkomen recht talud bestaat, maar uit taluddelen met verschillende hellingen en ook eventueel met één of meerdere bermen. Zie Figuur S.1 voor een schematische weergave van de taludhelling.



Figuur S.1 Bepaling van de representatieve taludhelling bij een talud samengesteld uit verschillende taludhellingen, exclusief een eventuele berminvloed (TAW, 2002)

De representatieve taludhelling volgt uit de volgende relatie:

$$\tan\alpha = \frac{1,5H_{m0} + z_{2\%}}{L_{talud} - B} \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.1)}$$

waarin:

α	=	hoek van het talud	[°]
H_{m0}	=	significante golfhoogte	[m]
$z_{2\%}$	=	2%-golfoploopniveau boven de stilwaterlijn	[m]
L_{talud}	=	horizontale lengte tussen twee punten op het talud op $z_{2\%}$ boven en $1,5H_{m0}$ onder de stilwaterlijn	[m]
B	=	bermbreedte (horizontaal)	[m]

Aangezien $z_{2\%}$ niet op voorhand bekend is iteratie nodig. De eerste schatting van $z_{2\%}$ wordt hiervoor gesteld op H_{m0}. Mocht H_{m0} of $z_{2\%}$ boven de kruin uitkomen, dan dient de kruinhoogte als kenmerkend punt worden aangehouden.

S.2 Golfoploophoogte

De hoeveelheid golfoploop kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} = 1{,}75\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\xi_0 \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.2)}$$

met een maximum voor waarden van de brekerparameter ξ_0 groter dan 1.75:

$$\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f\gamma_\beta\left(4{,}3 - \frac{1{,}6}{\sqrt{\xi_0}}\right) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.3)}$$

waarin:

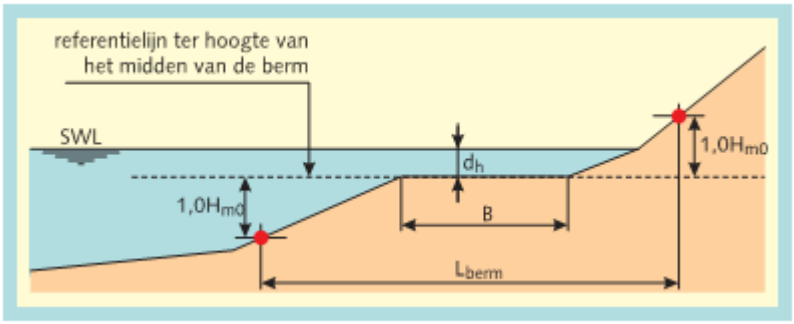
$z_{2\%}$	=	2%-golfoploopniveau boven de stilwaterlijn	[m]
H_{m0}	=	significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	=	brekerparameter	[-]
γ_b	=	invloedsfactor voor een berm	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor ruwheid op het talud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor scheve golfaanval	[-]

Deze vergelijking is geldig in het gebied $0{,}5 < \gamma_b\xi_0 < 8$ à 10.
Verder moet het volgende gelden: $\gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \geq 0{,}4$

De waarden waarvoor extra berekeningen dienen te worden uitgevoerd worden hieronder besproken.

S.2.1 Invloedsfactor berm (γ_b)

In het dwarsprofiel van de Afsluitdijk zijn bermen aanwezig welke een invloed op de golfoploop kunnen hebben.



Figuur S.2 Bepaling van de verandering in taludhelling bij een berm (TAW, 2002)

De invloed van deze berm zal hieronder berekend worden. De vergelijking voor het berekenen van de invloedsfactor van de berm is:

$$\gamma_b = 1 - r_B \cdot (1 - r_{dh}) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.4)}$$

met: $r_B = \frac{B}{L_{berm}}$ en $r_{dh} = 0{,}5 - 0{,}5 \cdot \cos\left(\pi\frac{d_h}{x}\right)$ (cos in radialen)

Verder geldt: $0{,}6 \leq \gamma_b \leq 1{,}0$.

Hierin is:

r_B	=	invloedsfactor voor de bermbreedte	[-]
r_{dh}	=	invloedsfactor voor de bermligging	[-]
B	=	bermbreedte	[m]
L_{berm}	=	horizontale lengte tussen twee punten op het talud op $1,0 \cdot H_{m0}$ boven en $1,0 \cdot H_{m0}$ onder het midden van de berm	[m]
d_h	=	bermdiepte ten opzichte van SWL (negatief is berm boven SWL)	[m]
x	=	$\begin{cases} z_{2\%} \text{ als } z_{2\%} > -d_h > 0 \text{ (berm boven SWL)} \\ 2H_{m0} \text{ als } 2H_{m0} > -d_h \geq 0 \text{ (berm beneden SWL)} \end{cases}$	
r_{dh}	=	1 als $-d_h \geq z_{2\%}$ of $d_h \geq 2 \cdot H_{m0}$ (buiten invloedsgebied)	

S.2.2 Invloedsfactor scheve golfaanval

Voor de 2%-golfoploop bij kortkammige golven geldt:

$$\gamma_\beta = 1 - 0,0022|\beta| \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.5)}$$

waarin:
$\beta =$ hoek van golfaanval [°]

S.3 Golfoverslaghoogte

Met de voorgaand berekende waarden kan nu ook de golfoverslaghoogte berekend worden. Dit gebeurt met behulp van de volgende vergelijking:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_0 \exp\left(-4,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.6)}$$

met als maximum:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \exp\left(-2,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f - \gamma_\beta} \right) \qquad \text{(TAW, 2002)} \qquad \text{(S.7)}$$

met: $\xi_0 = \dfrac{\tan\alpha}{\sqrt{s_{m-1,0}}}$

met: $s_{m-1,0} = \dfrac{H_{m0}}{L_0}$, $L_0 = \dfrac{gT_{m-1,0}^2}{2\pi}$ en $T_{m-1,0} = \dfrac{T_p}{1,1}$

waarin:

q	=	gemiddeld golfoverslagdebiet per meter	[$m^3/s/m$]
g	=	versnelling van de zwaartekracht	[m/s^2]
H_{m0}	=	spectrale golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
ξ_0	=	brekerparameter	[-]
$s_{m-1,0}$	=	golfsteilheid	[-]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode bij de teen van de dijk	[s]
T_p	=	piekperiode bij de teen van de dijk	[s]
α	=	hoek van het buitentalud	[-]
h_k	=	vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn	[m]
γ_b	=	invloedsfactor voor invloed van een berm op het talud	[-]
γ_f	=	invloedsfactor voor invloed van ruwheid op het talud	[-]
γ_β	=	invloedsfactor voor invloed van hoek van golfaanval op het talud	[-]
γ_v	=	invloedsfactor voor invloed van een verticale wand op het talud	[-]

De volgende gemiddelde golfoverslagdebieten zijn maatgevend voor erosie van het binnentalud:

- 0,1 l/m per s voor zandig grond met een slechte grasmat.
- 1,0 l/m per s voor kleiige grond met een redelijk goede grasmat.
- 10 l/m per s bij een kleibekleding en een grasmat volgens de eisen voor het buitentalud of bij een kleibekledingsconstructie.

T Berekening golfoploop en golfoverslag (PC-Overslag)

T.1 Ingevoerde parameters

In Tabel T.1 zijn de ingevoerde parameters voor het programma PC-Overslag weergegeven.

Tabel T.1 Ingevoerde parameters

parameter	eenheid	waarde	dimensie
golfparameters	H_s	3,30	(m)
	T_p	8,05	(s)
	β	0	(°) t.o.v. noorden
waterpeil	$h_{mhw;G+}$	5,78	(m)
	$h_{mhw;W+}$	6,03	(m)

T.2 Resultaten PC-Overslag

In Tabel T.2 zijn de resultaten van PC-Overslag voor klimaatscenario G+ en W+ weergegeven.

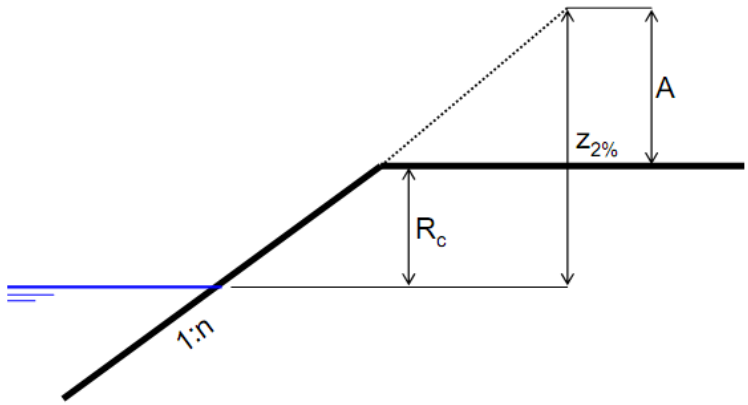
Tabel T.2 Resultaten PC-Overslag

klimaatscenario	q (l/s/m)	h_{mhw} (m+NAP)	γ_b (-)	γ_f (-)	$\gamma_{\beta;ru}$ (-)	$\gamma_{\beta;ovt}$ (-)	$z_{2\%}$ (m)	$h_{mhw}+z_{2\%}$ (m)	$h_{kruin;ovt}$ [1] (m+NAP)
G+	0,1	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,35	13,33
	1,0	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,35	11,63
	10,0	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,35	9,92
	40,0	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	5,54	11,32	8,88
	302,2	5,78	0,85	0,90	1,00	1,00	6,49	12,27	7,80
W+	0,1	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,60	13,58
	1,0	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,60	11,88
	10,0	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,57	11,60	10,17
	40,0	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	5,54	11,57	9,13
	409,3	6,03	0,85	0,90	1,00	1,00	6,52	12,55	7,80

[1]: $k_{kr;ovt}$ = minimaal benodigde kruinhoogte voor golfoploop/golfoverslag

U Berekening laagdikte en stroomsnelheid

U.1 Parameters



Figuur U.1 Definitie parameters BOSMAN

In Tabel U.1 zijn de algemene parameters weergegeven die in de berekeningen zijn gebruikt.

Tabel U.1 Algemene parameters berekeningen laagdikte en stroomsnelheid

parameter	waarde	dimensie
R_c (G+;q=10)	4,46	(m)
R_c (G+;q=40)	3,37	(m)
R_c (W+;q=10)	4,48	(m)
R_c (W+;q=40)	3,38	(m)
B_c	3,00	(m)
x_c	3,00	(m)
f	0,02	(-)
f_L	0,005	(-)
s	1,00	(m)

Verder zijn voor de berekeningen volgens de theorie van Schüttrumpf de parameters in Tabel U.2 weergegeven.

Tabel U.2 Parameters berekeningen Schüttrumpf

parameter	waarde	dimensie
$c'_{h,2\%}$	0,33	(-)
$c'_{u,2\%}$	0,50	(-)
$c''_{h,2\%}$	0,89	(-)
$c''_{u,2\%}$	1,37	(-)

Tot slot zijn voor de berekeningen volgens de theorie van Van Gent de parameters in Tabel U.3 weergegeven.

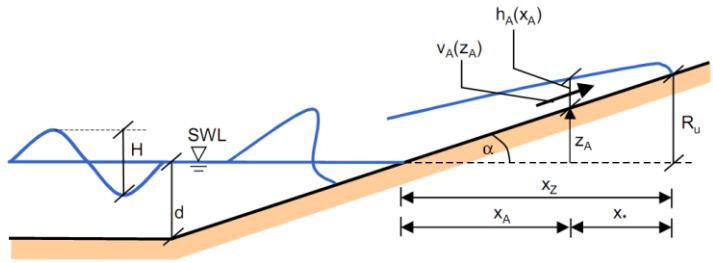
Tabel U.3 Parameters berekeningen Van Gent

parameter	waarde	dimensie
$c'_{h,2\%}$	0,15	(-)
$c'_{u,2\%}$ (seaward)	1,30	(-)
$c'_{u,2\%}$ (landward)	1,70	(-)
$c''_{h,2\%}$	0,10	(-)
$c''_{u,2\%}$	0,10	(-)

Hieronder zullen per locatie de resultaten voor de maximum laagdikten en maximum stroomsnelheden worden weergegeven.

U.2 Buitentalud

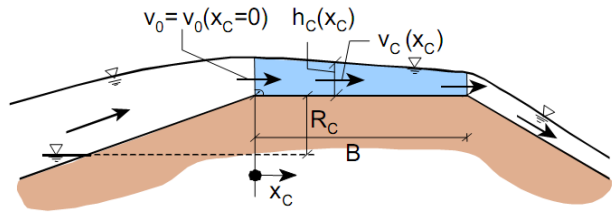
De parameters voor het berekenen van de maximum laagdikte en maximum stroomsnelheid op het buitentalud zijn weergegeven in Figuur U.2.



Figuur U.2 Laagdikte en stroomsnelheden op het buitentalud

U.3 Kruin

De parameters voor het berekenen van de maximum laagdikte en maximum stroomsnelheid op de kruin zijn weergegeven in Figuur U.3.



Figuur U.3 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag op de kruin

De resultaten voor de zeezijde van de kruin zijn weergegeven in Figuur U.4.

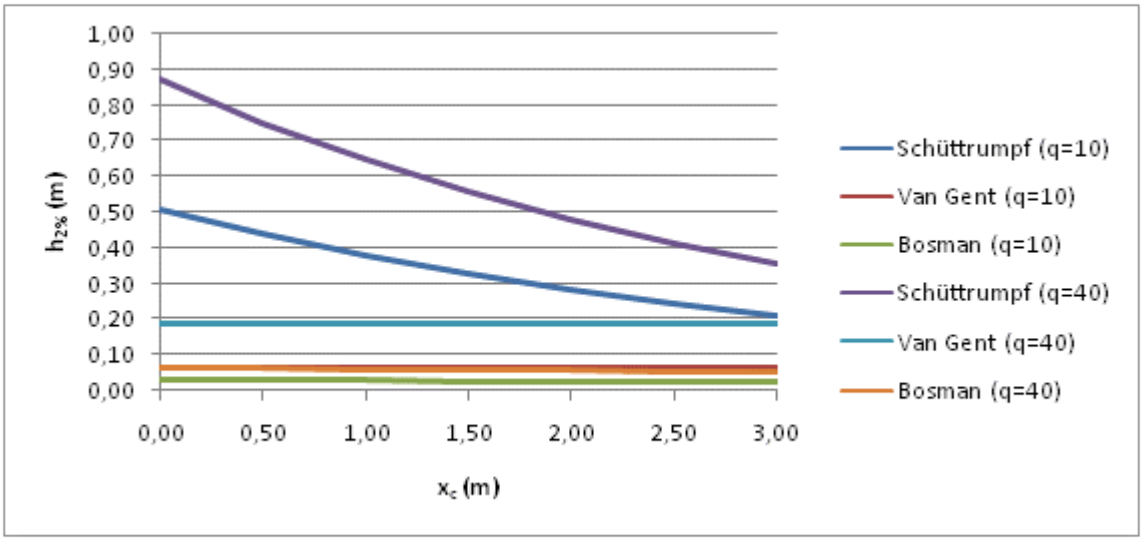
Tabel U.4 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag aan de zeezijde van de kruin (buitenkruinlijn)

climate model	Schüttrumpf		Van Gent		Bosman	
	$h_{2\%}(x_c=0)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=0)$ (m/s)	$h_{2\%}(x_c=0)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=0)$ (m/s)	$h_{2\%}(x_c=0)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=0)$ (m/s)
G+ (q=10)	0,51	1,94	0,10	3,27	0,04	3,58
G+ (q=40)	0,87	2,54	0,28	5,56	0,08	5,06
W+ (q=10)	0,50	1,94	0,09	3,24	0,04	3,56
W+ (q=40)	0,87	2,54	0,28	5,54	0,08	5,04

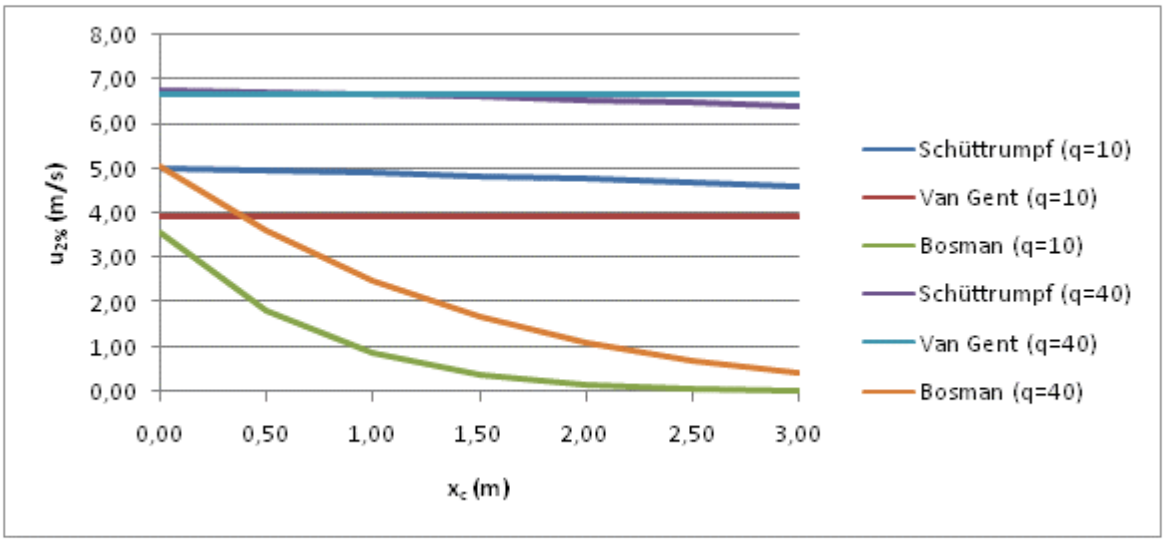
De resultaten voor de landzijde van de kruin zijn weergegeven in Figuur U.5.

Tabel U.5 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag aan de landzijde van de kruin (binnenkruinlijn)

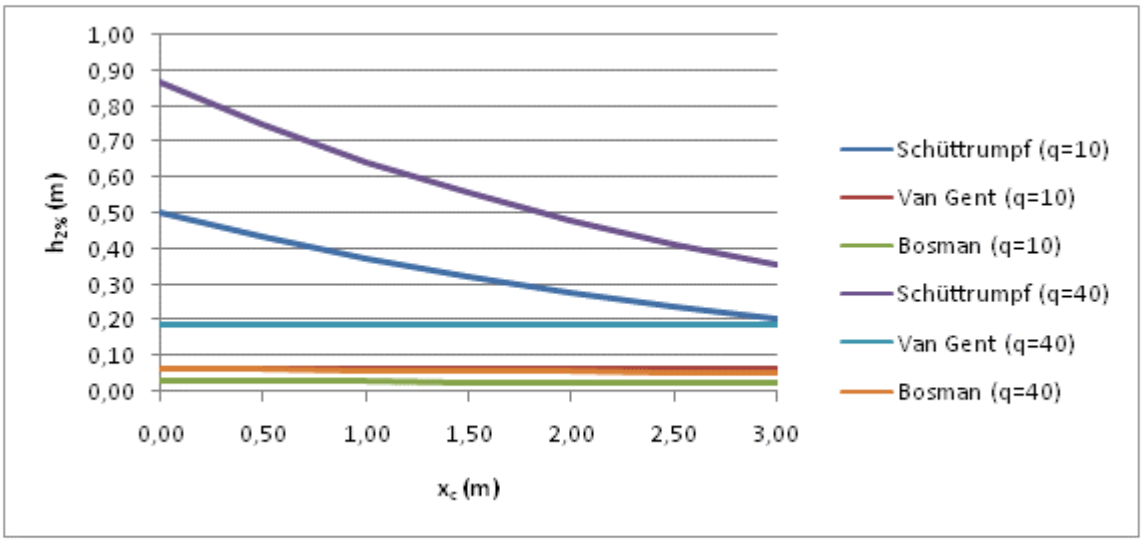
climate model	Schüttrumpf		Van Gent		Bosman	
	$h_{2\%}(x_c=B_c)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=B_c)$ (m/s)	$h_{2\%}(x_c=B_c)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=B_c)$ (m/s)	$h_{2\%}(x_c=B_c)$ (m)	$u_{2\%}(x_c=B_c)$ (m/s)
G+ (q=10)	0,21	4,61	0,06	3,92	0,03	0,03
G+ (q=40)	0,36	6,41	0,19	6,67	0,05	0,45
W+ (q=10)	0,21	4,59	0,06	3,88	0,03	0,03
W+ (q=40)	0,36	6,39	0,19	6,64	0,05	0,44



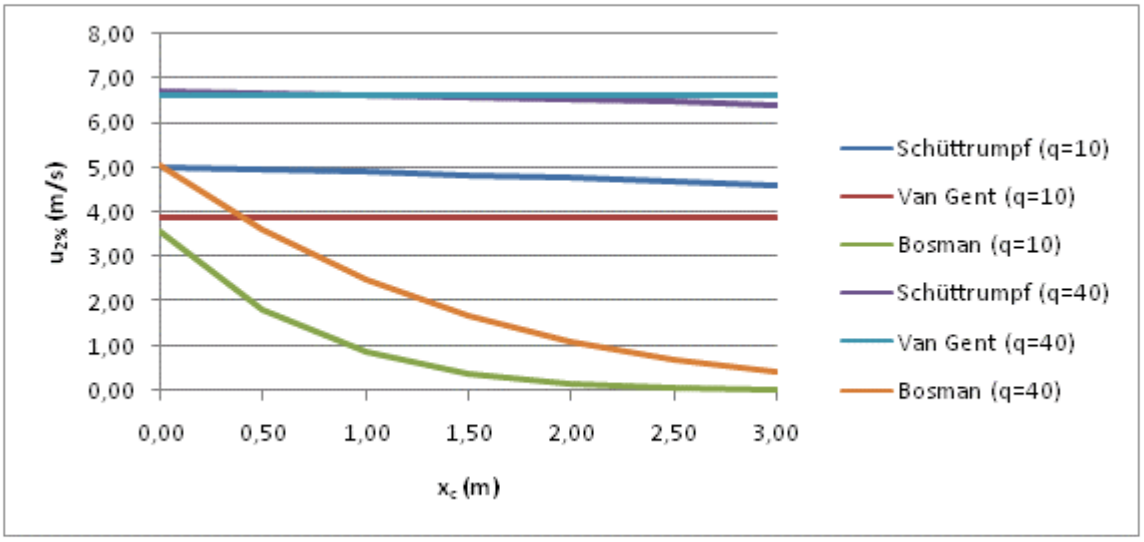
Figuur U.4 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario G+)



Figuur U.5 Stroomsnelheid afgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario G+)



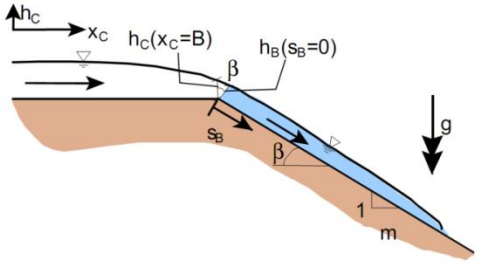
Figuur U.6 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario W+)



Figuur U.7 Stroomsnelheid afgezet tegen de afstand op de kruin (klimaatscenario W+)

U.4 Binnentalud

De parameters voor het berekenen van de maximum laagdikte en maximum stroomsnelheid op het binnentalud zijn weergegeven in Figuur U.8.

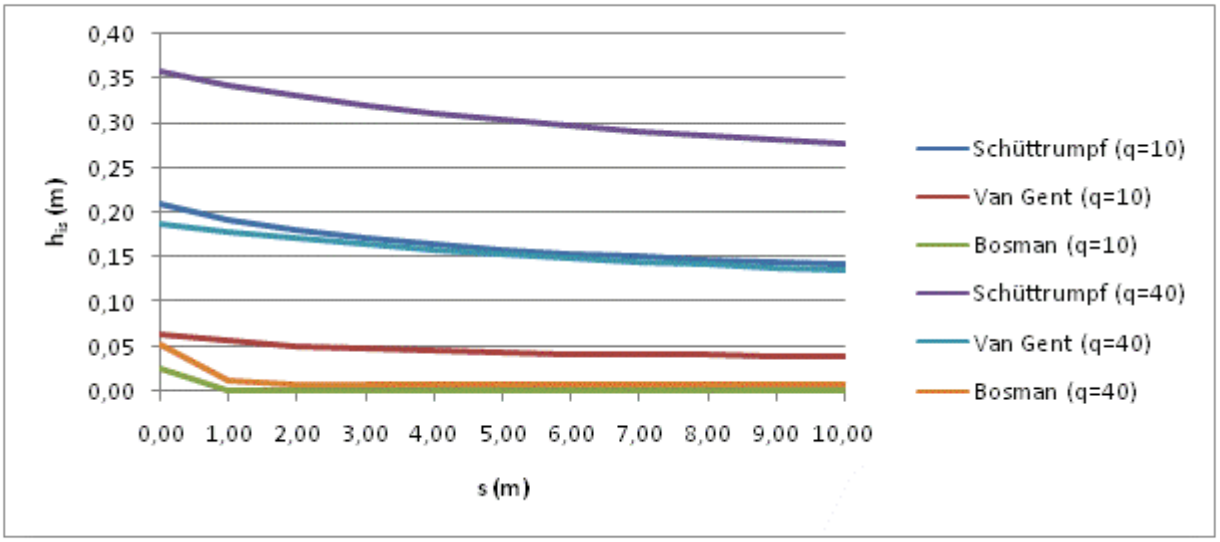


Figuur U.8 Laagdikte en stroomsnelheden op het binnentalud

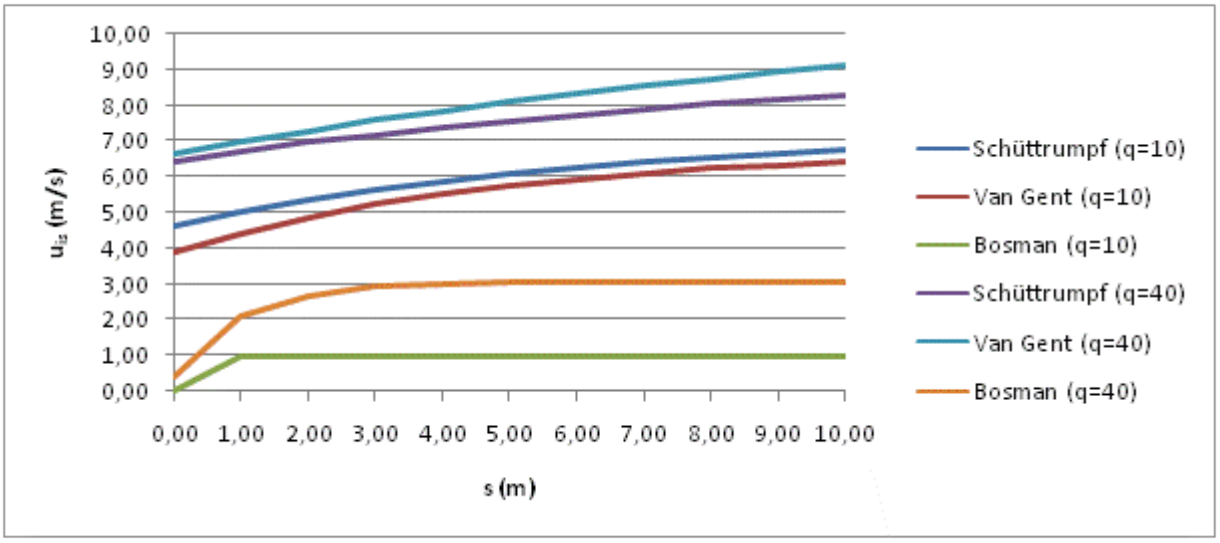
De resultaten voor het binnentalud zijn weergegeven in Tabel U.6.

Tabel U.6 Laagdikte en stroomsnelheden bij overslag op het binnentalud (s = 3,00 m)

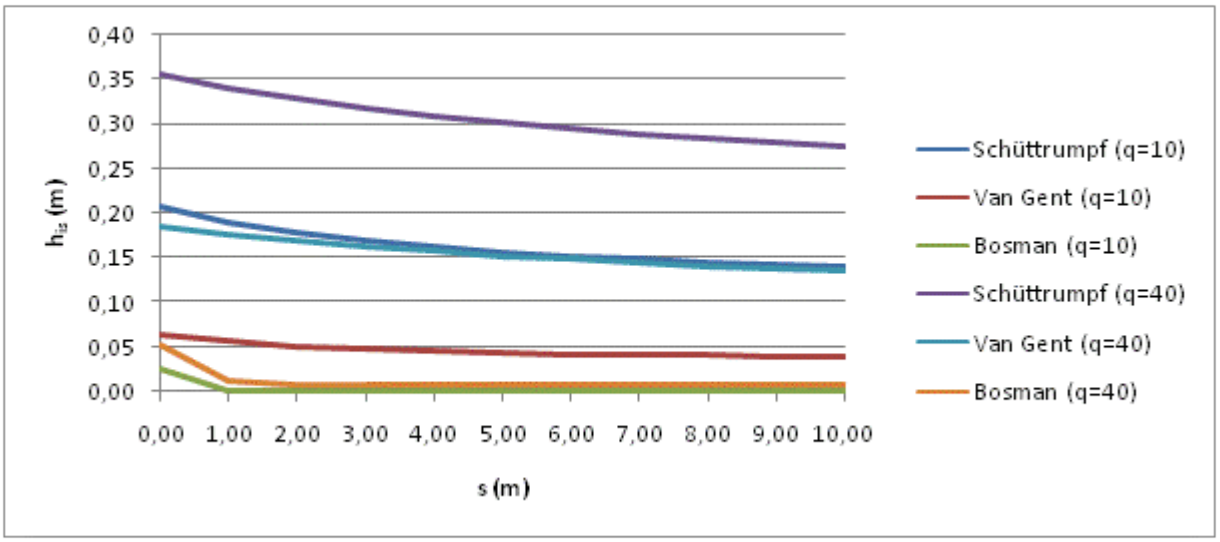
climate model	Schüttrumpf		Van Gent		Bosman	
	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)	$h_{is}(s)$ (m)	$u_{is}(s)$ (m/s)
G+ (q=10)	0,21	4,61	0,06	3,92	0,03	0,03
G+ (q=40)	0,36	6,41	0,19	6,67	0,05	0,45
W+ (q=10)	0,21	4,59	0,06	3,88	0,03	0,03
W+ (q=40)	0,36	6,39	0,19	6,64	0,05	0,44



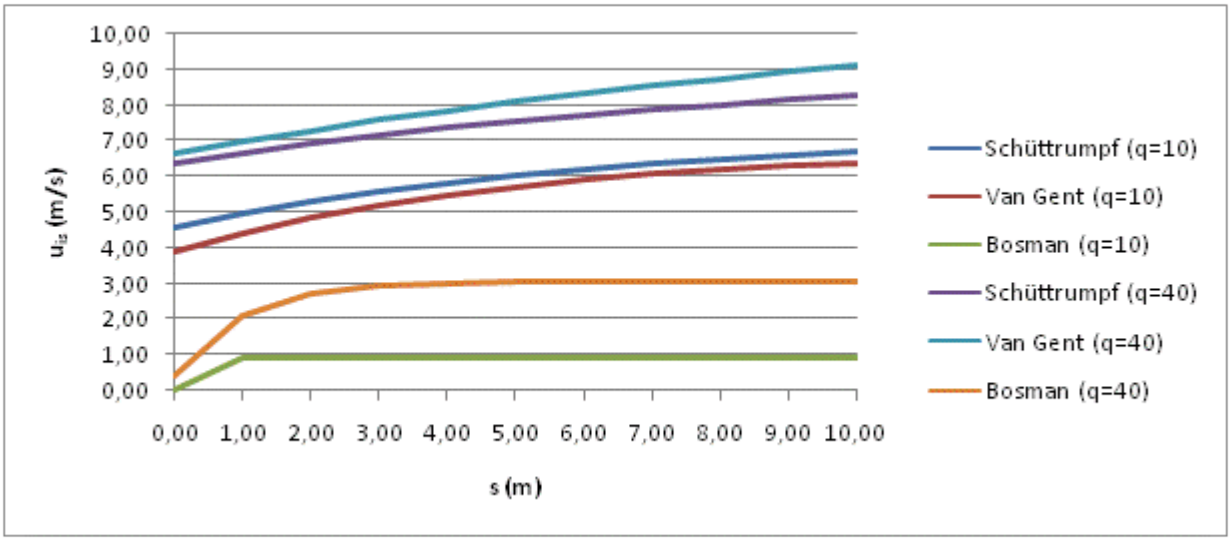
Figuur U.9 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario G+)



Figuur U.10 Stroomsnelheid uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario G+)



Figuur U.11 Laagdikte uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario W+)



Figuur U.12 Stroomsnelheid uitgezet tegen de afstand op het binnentalud (klimaatscenario W+)

V Stabiliteit losgestorte bekleding bij stroming

V.1 Parameters

In Tabel V.1 zijn de parameters voor de berekening van de nominale diameter van de losgestorte steen onder de zonnepanelen weergegeven.

Tabel V.1 Parameters berekeningen stabiliteit losgestorte bekleding onder zonnepanelen

climate model	q (l/s/m)	ρ_w (kg/m^3)	ρ_g (kg/m^3)	Δ (-)	h_{is}(s) (m)	u_{is}(s) (m/s)	Ψ_c (-)
G+	10	1000	2650	1,65	0,11	5,58	0,030
	40	1000	2650	1,65	0,24	7,50	0,030
W+	10	1000	2650	1,65	0,10	5,55	0,030
	40	1000	2650	1,65	0,23	7,49	0,030

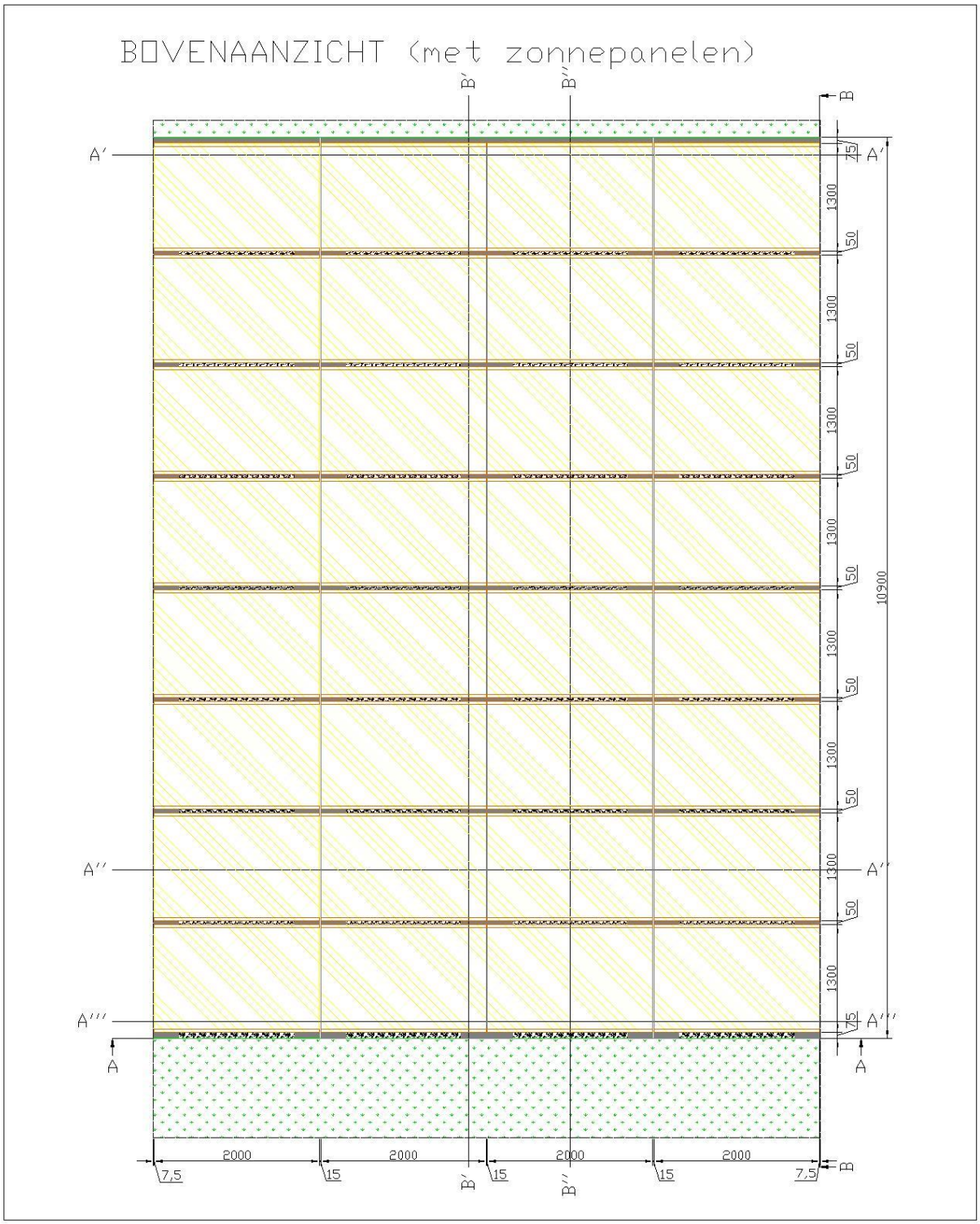
V.2 Resultaten

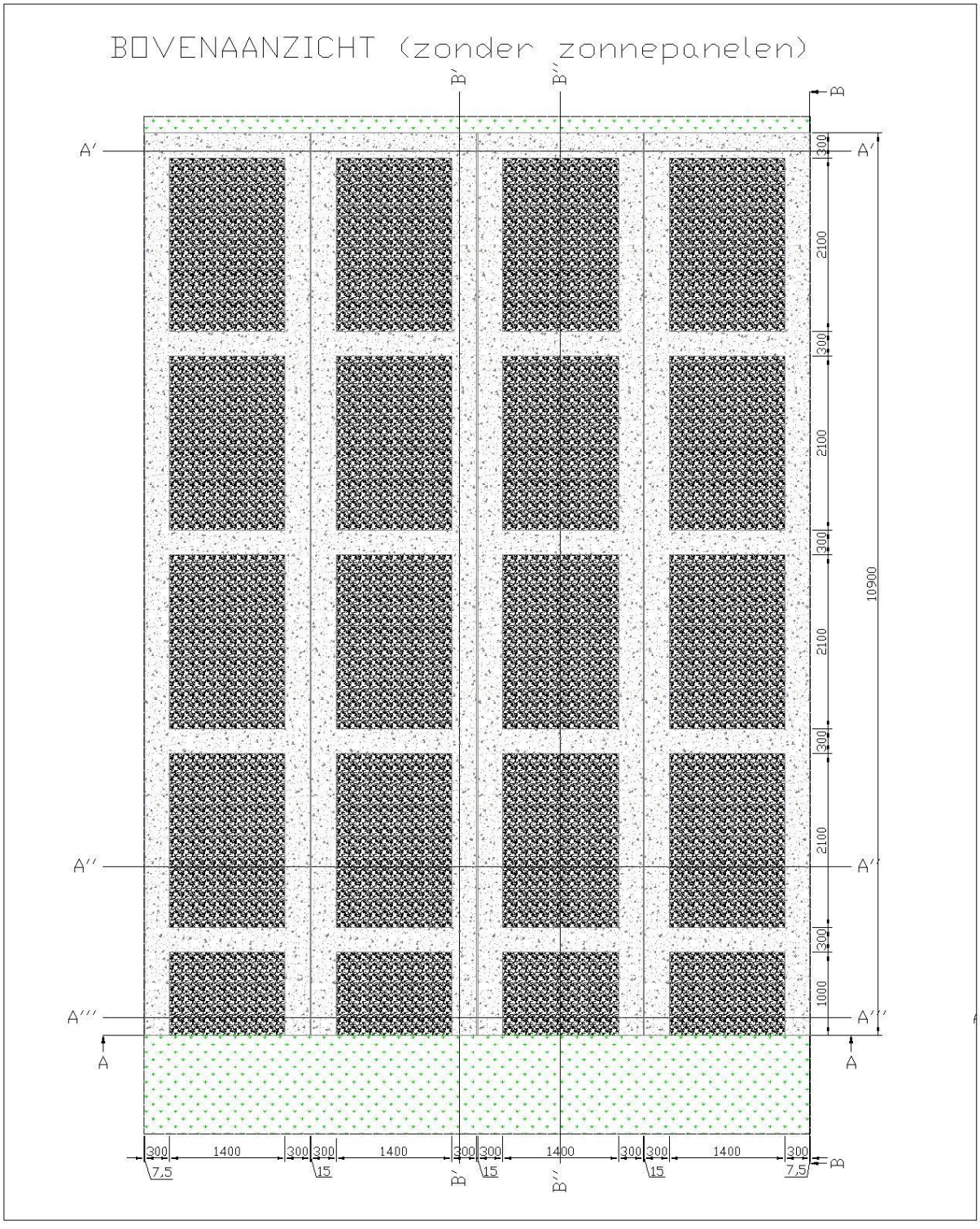
In Tabel V.2 is de berekening van de nominale diameter van de losgestorte steen onder de zonnepanelen weergegeven.

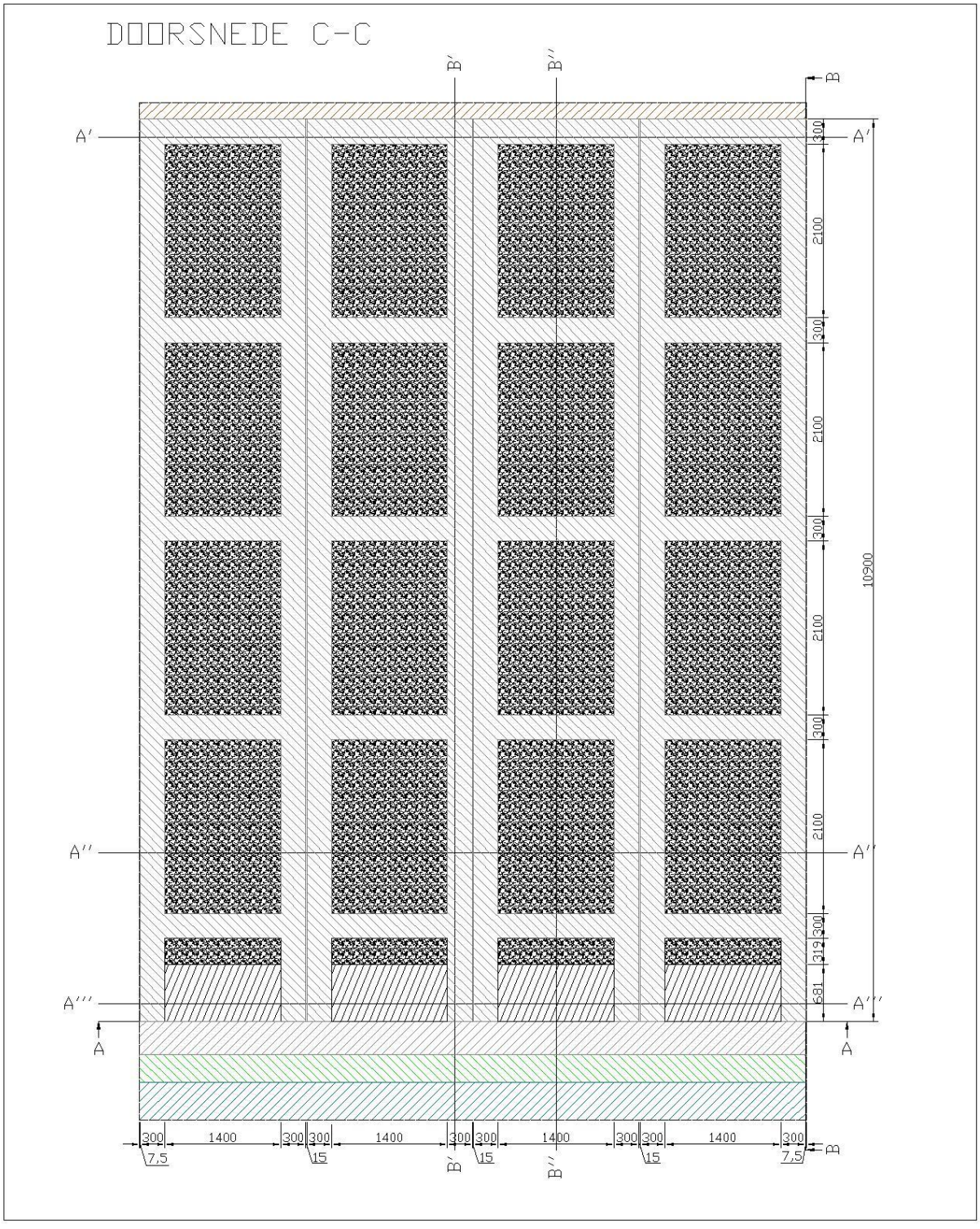
Tabel V.2 Berekening nominale diameter losgestorte steen

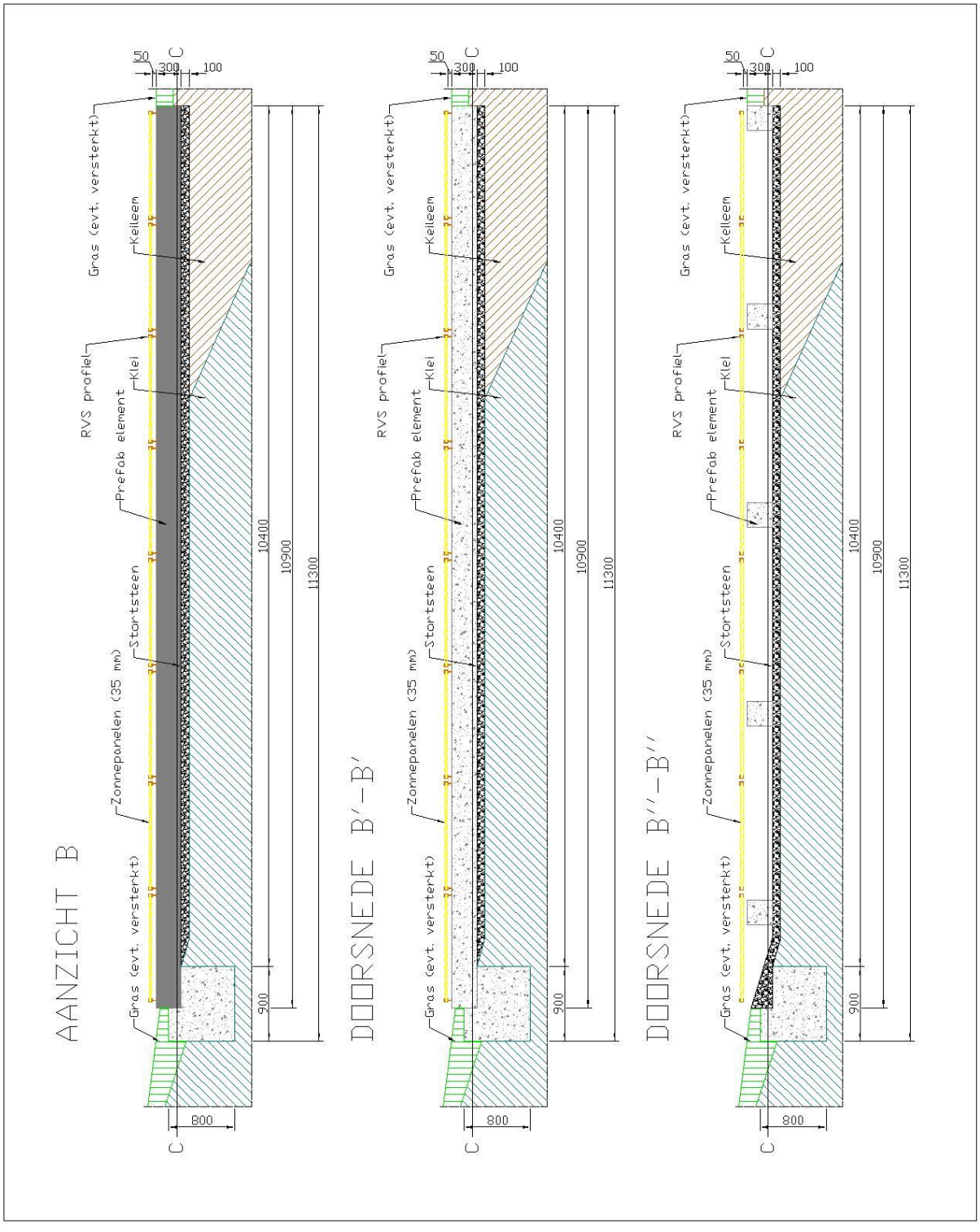
climate model	q (l/s/m)	C (m$^{1/2}$/s)	d_{n50} (m)	ϕ (°)	α (°)	K_s (-)	d_{n50} (m)	ρ_a (kg/m^3)	W_{50} (kg)
G+	10	-29,146	0,740	31,7	18,4	0,44	1,70	2650	12.725
	40	-21,872	2,378	31,7	18,4	0,44	5,46	2650	422.340
W+	10	-29,294	0,725	31,7	18,4	0,44	1,66	2650	11.970
	40	-21,920	2,356	31,7	18,4	0,44	5,40	2650	410.402

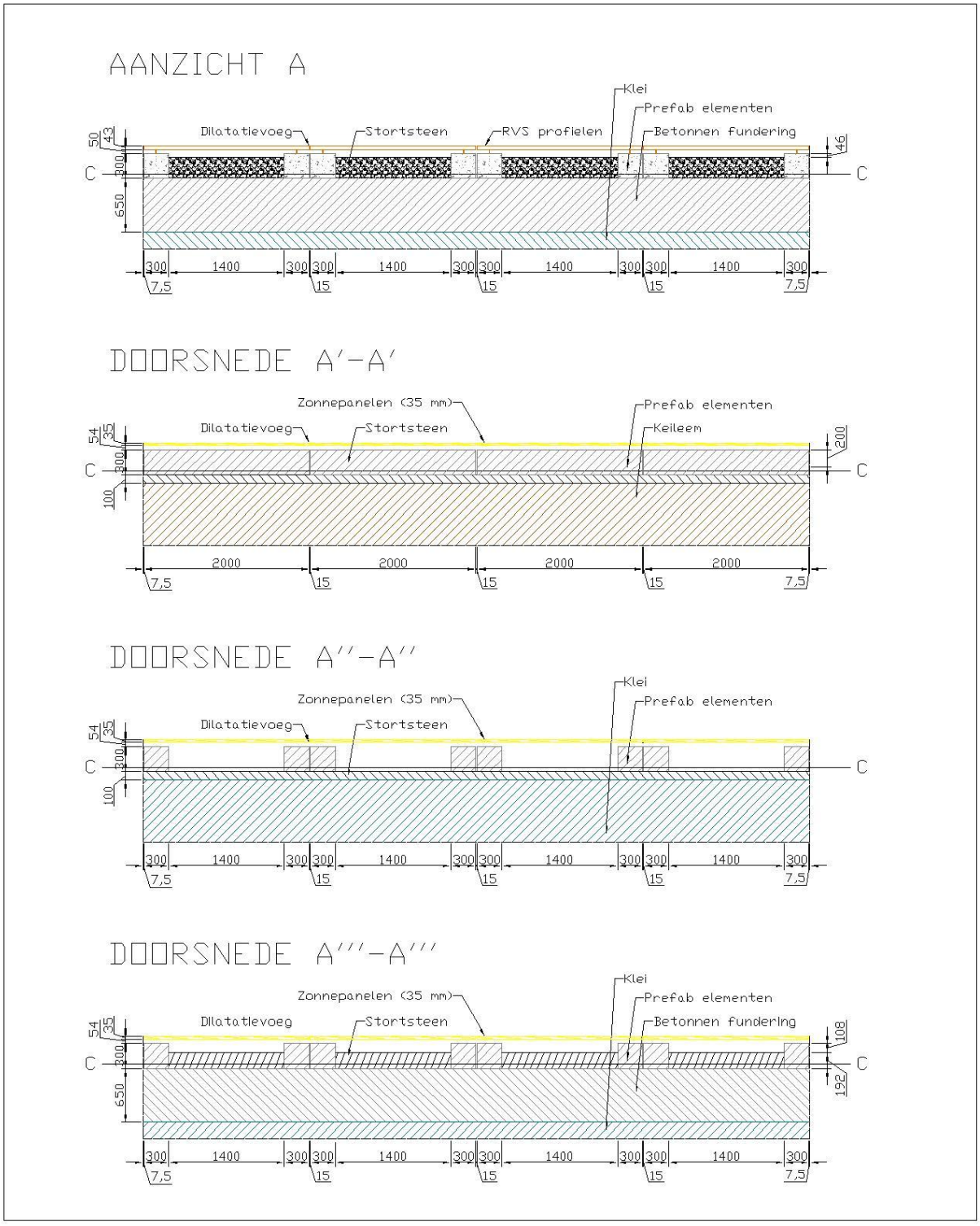
W Tekeningen integraal ontwerp




BOVENAANZICHT (zonder zonnepanelen)
B'
B''
B
A'
A''
A'''
A
300
2100
1000
10900
1400
7,5
15


DOORSNEDE C-C
B'
B''
B
A'
A''
A'''
A
300
2100
10200
319
681
1400
7,5
15


AANZICHT B
DOORSNEDE B'-B'
DOORSNEDE B''-B''
Gras (evt. versterkt)
Zonnepanelen (35 mm)
Stortsteen
PreFab element
Klei
RVS profiel
Kelleem
50
300
100
C
10400
10900
11300
900
800


AANZICHT A
Klei
Prefab elementen
Dilatatievoeg
Stortsteen
RVS profielen
Betonnen fundering
50
43
300
650
46
C
C
300
1400
300
300
1400
300
300
1400
300
300
1400
300
7,5
15
15
15
7,5
DOORSNEDE A'-A'
Zonnepanelen (35 mm)
Prefab elementen
Dilatatievoeg
Stortsteen
Keileem
54
35
300
100
200
C
C
2000
2000
2000
2000
7,5
15
15
15
7,5
DOORSNEDE A''-A''
Klei
Zonnepanelen (35 mm)
Prefab elementen
Dilatatievoeg
Stortsteen
54
35
300
100
C
C
300
1400
300
300
1400
300
300
1400
300
300
1400
300
7,5
15
15
15
7,5
DOORSNEDE A'''-A'''
Klei
Zonnepanelen (35 mm)
Prefab elementen
Dilatatievoeg
Stortsteen
Betonnen fundering
54
35
300
650
108
192
C
C
300
1400
300
300
1400
300
300
1400
300
300
1400
300
7,5
15
15
15
7,5